



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# Estudio del efecto de alabeo en anillos de revestimiento de túnel formado por dovelas prefabricadas de hormigón

Treball realitzat per:

**Sandro Bernardo Gagnay Yunga**

Dirigit per:

**Javier Pablo Ainchil Lavin**

**Gonzalo Ramos Schneider**

Màster en:

**Enginyeria de Camins, Canals i Ports**

Barcelona, 28 de setembre de 2019

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

**TREBALL FINAL DE MÀSTER**

## RESUMEN

Actualmente, el mundo está evolucionando de manera notable en el aspecto tecnológico y científico. Estos avances conllevan a realizar una determinada tarea de manera más seguro y rápida; incluso pudiendo resolver algunos problemas que antes no podían ser resueltos.

En la presente tesina, se ha analizado un problema que existe hoy en día, en la construcción de túneles, mediante un programa de elemento finitos (Sap2000); que gracias a la introducción de datos reales proporciona una solución aproximada a la que se obtiene en la realidad física.

El problema en cuestión, es cuantificar y deducir los factores que influye en la deformación axial (Alabeo) de los anillos, que componen un túnel. Este efecto puede generar ciertos problemas de durabilidad en estas tipologías de obras, y se puede considerar de gran interés, debido a que normalmente los túneles se construyen a una cierta profundidad y suelen estar en contacto permanente con el nivel freático.

En esta investigación se han obtenido resultados relevantes, respecto a las posibles causas de porque se pueden generar goteras en el interior de los túneles.

Por un lado, se ha podido establecer unos valores límites de las deformaciones que se pueden obtener en función del tipo de condición de contorno que se quiera imponer en las juntas. De esta forma, la persona responsable del proyecto puede optar entre una u otra en función de la necesidad que requiera la obra in situ.

Por el otro lado, se ha obtenido como resultado final que el efecto del alabeo puede inducir ciertas pérdidas a compresión en las juntas circunferenciales. En resumen, como el anillo tiende a salirse de su plano, en algunas ocasiones, la fuerza de los gatos hidráulicos no es suficiente para desplazar las dovelas a su sitio original; pudiendo dejar ciertas zonas abiertas entre anillos, y por donde se puede filtrar el agua, y como consecuencia, ocasionar serios problemas de durabilidad en la estructura.

## **AGRADECIMIENTOS**

Me gustaría agradecer a mis padres y a mi hermana, por todo su apoyo incondicional durante mi estancia en la universidad, que me ha ayudado a conseguir mi objetivo principal, que básicamente sería convertirme en una persona de provecho para la sociedad y que pueda ayudar en la resolución de nuevos retos que se plantean día a día en nuestra sociedad.

También, debo dar las gracias a Javier Ainchil y Gonzalo Ramos, que sin su ayuda y sin sus consejos, la realización de esta tesina no hubiera sido posible. Además, agradecerles por su alto compromiso en la implicación de esta investigación.

# ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>2</b>
<b>ÍNDICE GENERAL .....</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE GRÁFICOS .....</b>	<b>8</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>9</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>10</b>
1.1    Introducción general .....	10
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>12</b>
2.1    Introducción .....	12
2.2    Fases de construcción.....	14
2.3    TBM.....	18
2.4    Dovelas prefabricadas .....	19
2.5    Conexiones.....	21
2.6    Tipologías de anillos .....	23
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>26</b>
3.1    Introducción .....	26
3.2    Geometría.....	28
3.3    Características mecánicas .....	33
3.4    Tipologías de cargas .....	35



3.4.1	Cargas Radiales.....	36
3.4.2	Cargas Reales.....	36
3.4.3	Fuerza de los gatos hidráulicos .....	39
3.5	Condiciones de apoyo .....	41
3.6	Combinaciones.....	46
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</b>	<b>48</b>
4.1	Introducción .....	48
4.2	Dovela trapezoidal .....	51
4.2.1	Articulada.....	51
4.2.2	Empotrada .....	54
4.2.3	Comparativa .....	56
4.3	Dovela paralelográfica .....	59
4.3.1	Articulada.....	59
4.3.2	Empotrada .....	62
4.3.3	Comparativa .....	64
4.4	Dovela clave.....	67
4.4.1	Articulada.....	67
4.4.2	Empotrada .....	70
4.4.3	Comparativa .....	72
4.5	Formación de un anillo .....	75
4.5.1	Comparativa .....	79
4.6	Formación de dos anillos .....	82
4.6.1	Comparativa .....	86
4.7	Formación de tres anillos .....	90
4.7.1	Comparativa .....	94
4.8	Introducción de gatos.....	98
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>105</b>
5.1	Conclusiones finales .....	105
5.2	Nuevas futuras líneas de investigación .....	106
<b>6.</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>108</b>
6.1	Referencias bibliográficas.....	108

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Construcción de un túnel en los tiempos pasados .....	13
<b>Figura 2.</b> Forma genérica de una TBM .....	14
<b>Figura 3.</b> Acopio de los elementos prefabricados .....	14
<b>Figura 4.</b> Montaje de la cabeza de corte .....	16
<b>Figura 5.</b> Vista general del Back up .....	18
<b>Figura 6.</b> Esquema gráfico de la colocación de las dovelas mediante TBM .....	20
<b>Figura 7.</b> Juntas circunferenciales y longitudinales .....	23
<b>Figura 8.</b> Conceptos fundamentales para la presente tesina .....	25
<b>Figura 9.</b> Desglose del anillo del túnel a analizar .....	25
<b>Figura 10.</b> Croquis del anillo .....	29
<b>Figura 11.</b> Orientación del túnel .....	29
<b>Figura 12.</b> Dovela "Clave" empotrada .....	30
<b>Figura 13.</b> Dovela "Paralelogramo" empotrada .....	31
<b>Figura 14.</b> Dovela "Trapezoidal" empotrada .....	31
<b>Figura 15.</b> Un anillo formado con dovelas individuales .....	32
<b>Figura 16.</b> Dos anillos formados con dovelas individuales .....	32
<b>Figura 17.</b> Tres anillos formados con dovelas individuales .....	33
<b>Figura 18.</b> Carga radial sobre la estructura $10 \text{ kN/m}^2$ .....	36
<b>Figura 19.</b> Carga de la presión de tierra proyección X (KN) .....	37
<b>Figura 20.</b> Carga de la presión de tierra proyección Y (KN) .....	38
<b>Figura 21.</b> Carga de la presión de agua proyección X (KN) .....	38
<b>Figura 22.</b> Carga de la presión de agua proyección Y (KN) .....	39
<b>Figura 23.</b> Distribución de la fuerza de los gatos de la tuneladora .....	40
<b>Figura 24.</b> Condiciones de contorno del terreno .....	42
<b>Figura 25.</b> Discretización de las juntas longitudinales .....	43
<b>Figura 26.</b> Modelización de las juntas circunferenciales .....	44
<b>Figura 27.</b> Condición de contorno en la fase de avance .....	45
<b>Figura 28.</b> Orientación de los ejes locales en los bordes .....	49
<b>Figura 29.</b> Etiquetado de los puntos que forman la dovela trapezoidal y sección longitudinal A .....	51
<b>Figura 30.</b> Deformada dovela trapezoidal articulada unidades en metro (x20) .....	51
<b>Figura 31.</b> Esfuerzos F11 unidades en kN/m .....	52

<b>Figura 32.</b> Esfuerzos F22 unidades en kN/m .....	52
<b>Figura 33.</b> Esfuerzos M11 unidades en kN·m/m.....	52
<b>Figura 34.</b> Esfuerzos M22 unidades en kN·m/m.....	53
<b>Figura 35.</b> Esfuerzos V13 unidades en kN/m.....	53
<b>Figura 36.</b> Esfuerzos V23 unidades en kN/m.....	53
<b>Figura 37.</b> Deformada dovela trapezoidal empotrada unidades en metro (x500).....	54
<b>Figura 38.</b> Esfuerzos F11 unidades en kN/m .....	54
<b>Figura 39.</b> Esfuerzos F22 unidades en kN/m .....	54
<b>Figura 40.</b> Esfuerzos M11 unidades en kN·m/m.....	55
<b>Figura 41.</b> Esfuerzos en M22 unidades en kN·m/m.....	55
<b>Figura 42.</b> Esfuerzos V13 unidades en kN/m.....	55
<b>Figura 43.</b> Esfuerzos V23 unidades en kN/m.....	56
<b>Figura 44.</b> Etiquetado de los puntos que forman la dovela paralelográfica y sección longitudinal B	59
<b>Figura 45.</b> Deformada dovela paralelográfica articulada unidades en metro (x200).....	59
<b>Figura 46.</b> Esfuerzos F11 unidades en kN/m .....	60
<b>Figura 47.</b> Esfuerzos F22 unidades en kN/m .....	60
<b>Figura 48.</b> Esfuerzos M11 unidades en kN·m/m.....	60
<b>Figura 49.</b> Esfuerzos M22 unidades en kN·m/m.....	61
<b>Figura 50.</b> Esfuerzos V13 unidades en kN/m.....	61
<b>Figura 51.</b> Esfuerzos V23 unidades en kN/m.....	61
<b>Figura 52.</b> Deformada dovela paralelográfica empotrada unidades en metro (x500).....	62
<b>Figura 53.</b> Esfuerzos F11 unidades en kN/m .....	62
<b>Figura 54.</b> Esfuerzos F22 unidades en kN/m .....	62
<b>Figura 55.</b> Esfuerzos M11 unidades en kN·m/m.....	63
<b>Figura 56.</b> Esfuerzos M22 unidades en kN·m/m.....	63
<b>Figura 57.</b> Esfuerzos V13 unidades kN/m.....	63
<b>Figura 58.</b> Esfuerzos V23 unidades en kN/m.....	64
<b>Figura 59.</b> Etiquetado de los puntos que forman la dovela clave y sección longitudinal C .....	67
<b>Figura 60.</b> Deformada dovela clave articulada unidades en metro (x500) .....	67
<b>Figura 61.</b> Esfuerzos F11 unidades en kN/m .....	68
<b>Figura 62.</b> Esfuerzos F22 unidades en kN/m .....	68
<b>Figura 63.</b> Esfuerzos M11 unidades en kN·m/m.....	68
<b>Figura 64.</b> Esfuerzos M22 unidades en kN·m/m.....	69
<b>Figura 65.</b> Esfuerzos V13 unidades en kN/m.....	69
<b>Figura 66.</b> Esfuerzos V23 unidades en kN/m.....	69
<b>Figura 67.</b> Deformada dovela clave empotrada unidades en metro (x500) .....	70
<b>Figura 68.</b> Esfuerzos F11 unidades en kN/m .....	70
<b>Figura 69.</b> Esfuerzos F22 unidades en kN/m .....	70
<b>Figura 70.</b> Esfuerzos M11 unidades en kN·m/m.....	71
<b>Figura 71.</b> Esfuerzos M22 unidades en kN·m/m.....	71

<b>Figura 72.</b> Esfuerzos V13 unidades en kN/m.....	71
<b>Figura 73.</b> Esfuerzos V23 unidades en kN/m.....	72
<b>Figura 74.</b> Modelo geométrico de un anillo y sección longitudinal D .....	76
<b>Figura 75.</b> Deformación de un anillo en ELS (x20) .....	76
<b>Figura 76.</b> Esfuerzos F11 y F22 respectivamente unidades en kN/m <b>Articulado</b> .....	77
<b>Figura 77.</b> Esfuerzos M11 y M22 respectivamente unidades en kN·m/m <b>Articulado</b> .....	77
<b>Figura 78.</b> Esfuerzos V13 y V23 respectivamente unidades en kN/m <b>Articulado</b> .....	77
<b>Figura 79.</b> Esfuerzos F11 y F22 respectivamente unidades en kN/m <b>Empotrado</b> .....	78
<b>Figura 80.</b> Esfuerzos M11 y M22 respectivamente unidades en kN·m/m <b>Empotrado</b> .....	78
<b>Figura 81.</b> Esfuerzos V13 y V23 respectivamente unidades en kN/m <b>Empotrado</b> .....	78
<b>Figura 82.</b> Modelo geométrico de dos anillos y sección longitudinal E.....	83
<b>Figura 83.</b> Deformación de dos anillos en ELS (x20) .....	83
<b>Figura 84.</b> Esfuerzos F11 y F22 respectivamente unidades en kN/m <b>Articulado</b> .....	84
<b>Figura 85.</b> Esfuerzos M11 y M22 respectivamente unidades en kN·m/m <b>Articulado</b> .....	84
<b>Figura 86.</b> Esfuerzos V12 y V13 respectivamente unidades en kN/m <b>Articulado</b> .....	84
<b>Figura 87.</b> Esfuerzos F11 y F22 respectivamente unidades en kN/m <b>Empotrado</b> .....	85
<b>Figura 88.</b> Esfuerzos M11 y M22 respectivamente unidades en kN·m/m <b>Empotrado</b> .....	85
<b>Figura 89.</b> Esfuerzos V13 y V23 respectivamente unidades en kN/m <b>Empotrado</b> .....	85
<b>Figura 90</b> Modelo geométrico de tres anillos y sección longitudinal F.....	91
<b>Figura 91.</b> Deformación de tres anillos en ELS (x20) .....	91
<b>Figura 92.</b> Esfuerzos F11 y F22 respectivamente unidades en kN/m <b>Articulado</b> .....	92
<b>Figura 93.</b> Esfuerzos M11 y M22 respectivamente unidades en kN·m/m <b>Articulado</b> .....	92
<b>Figura 94.</b> Esfuerzos V13 y V23 respectivamente unidades en kN/m <b>Articulado</b> .....	92
<b>Figura 95.</b> Esfuerzos F11 y F22 respectivamente unidades en kN/m <b>Empotrado</b> .....	93
<b>Figura 96.</b> Esfuerzos M11 y M22 respectivamente unidades en kN·m/m <b>Empotrado</b> .....	93
<b>Figura 97.</b> Esfuerzos V13 y V23 respectivamente unidades en kN/m <b>Empotrado</b> .....	93
<b>Figura 98.</b> Distribución de la fuerza de los gatos hidráulicos de 9.000 kN .....	100
<b>Figura 99.</b> Puntos de referencia sobre el efecto del alabeo .....	101

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfica 1.</b> Articulada vs Empotrada (Dovela trapezoidal) .....	57
<b>Gráfica 2.</b> Articulada vs Empotrada (Dovela paralelográfica) .....	65
<b>Gráfica 3.</b> Articulada vs Empotrada (Dovela clave) .....	73
<b>Gráfica 4.</b> Articulada vs Empotrada (Dovela clave) .....	80
<b>Gráfica 5.</b> Articulada vs Empotrada (Dovela clave) <b>Alabeo</b> .....	81
<b>Gráfica 6.</b> Articulada vs Empotrada (Dovela clave y trapezoidal).....	88
<b>Gráfica 7.</b> Articulada vs Empotrada (Dovela clave y trapezoidal) <b>Alabeo</b> .....	88
<b>Gráfica 8.</b> Articulada vs Empotrada (Dovela clave I, trapezoidal y clave II).....	96
<b>Gráfica 9.</b> Articulada vs Empotrada (Dovela clave I, trapezoidal y clave II) <b>Alabeo</b> .....	97
<b>Gráfica 10.</b> Comparativa del alabeo entre Articulada y Empotrada .....	103

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Propiedades isotrópicas del hormigón.....	34
<b>Tabla 2.</b> Repartición de la fuerza de gatos.....	40
<b>Tabla 3.</b> Propiedades del muelle que simula el terreno .....	41
<b>Tabla 4.</b> Propiedades del muelle que simula el terreno de apoyo del primer anillo .....	45
<b>Tabla 5.</b> Propiedades del muelle que simula la junta circunferencial.....	45
<b>Tabla 6.</b> Combinación ELS 1 .....	46
<b>Tabla 7.</b> Combinación ELS 2 .....	47
<b>Tabla 8.</b> Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno articulada.....	56
<b>Tabla 9.</b> Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno empotrada .....	57
<b>Tabla 10.</b> Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno articulada.....	64
<b>Tabla 11.</b> Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno empotrada .....	65
<b>Tabla 12.</b> Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno articulada.....	72
<b>Tabla 13.</b> Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno empotrada .....	73
<b>Tabla 14.</b> Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno articulada.....	79
<b>Tabla 15.</b> Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno empotrada .....	79
<b>Tabla 16.</b> Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno articulada.....	86
<b>Tabla 17.</b> Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno empotrada .....	87
<b>Tabla 18.</b> Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno articulada.....	95
<b>Tabla 19.</b> Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno empotrada .....	96
<b>Tabla 20.</b> Efecto de la fuerza de los gatos hidráulicos en la construcción de un túnel <b>Articulada</b> ...	101
<b>Tabla 21.</b> Efecto de la fuerza de los gatos hidráulicos en la construcción de un túnel <b>Empotrada</b> ..	103

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Introducción general

El objetivo principal de la presente tesina es determinar si los desplazamientos y los esfuerzos que se producen en la construcción de un túnel, están relacionados según las posiciones donde se ubiquen las dovelas, que son elementos prefabricados de hormigón, que mediante un ensamblaje se puede formar un anillo estructural que forma parte del túnel.

Además, se profundizará en el estudio del efecto del alabeo que normalmente aparece en estas tipologías de obras civiles. Se podrá observar unos resultados, sobre este fenómeno, relativamente llamativos y esenciales para poder entender mejor ciertos problemas que suelen originarse durante la fase constructiva y de explotación de un túnel.

Obviamente, si intentará investigar cómo se puede disminuir la deformación debida al alabeo. Esto se llevará a cabo mediante la modelización de varios casos, donde se variarán las condiciones de contorno, y su posterior comparativa entre ellas; con la finalidad de poder proporcionar al lector una solución razonable de como disminuir dicho problema.

También se mostrará cómo influye el alabeo teniendo en cuenta la modelización de dos y tres anillos sucesivos, pero con posiciones distintas. En esta parte, la dificultad se encuentra en el diseño de las juntas circunferenciales que son las encargadas de unir los anillos entre sí; de forma que se pueda transmitir continuidad de los esfuerzos, entre los diferentes anillos que forman esta obra lineal.

Otro aspecto que se considera en esta investigación, es ver la incidencia que provoca la fuerza de los gatos hidráulicos sobre los efectos del alabeo, que se producen en los elementos prefabricados que conforma los anillos del túnel.

Todos los resultados que se obtienen en este documento están basados en la geometría de un proyecto real, es decir, los valores finales podrán ser fácilmente reconocibles de si son

coherentes o si hay algún problema numérico, básicamente porque el tutor de esta tesina puede aportar su punto de vista debido a que tiene mucha experiencia en este campo de investigación.

Cuando se requiere examinar y encontrar resultados coherentes en el ámbito de la ingeniería civil, siempre se debe empezar modelando una estructura simple, y una vez verificado que funciona, se procede a unir los elementos simples hasta conseguir formar la estructura completa. En este caso, se analizarán las dovelas de manera individual y una vez se consiga que funcionen correctamente, se realizará el anillo entero.

La fase de análisis se ha llevado a cabo teniendo en cuenta dos tipos de condiciones de contorno, articulada y empotrada. En el apartado de metodología se puede observar cómo se han modelizados dichos apoyos, ya que es fundamental en la obtención de los resultados, por esa razón se intentará modelizar lo más similar a la realidad física.

Para la obtención de resultados se ha empleado un programa de elementos finitos, Sap2000, como herramienta de soporte numérico. Este programa genera una solución aproximada respecto a las cargas que se impongan en el diseño estructural, debido a que es un problema complejo es muy complicado obtener una solución analítica.

En la parte final de cada estructura analizada se podrá observar las conclusiones pertinentes que se han podido concluir mediante los resultados obtenidos y los puntos de vista de los tutores de la tesina. También cabe destacar que se ha realizado una comparativa entre modelos, es decir, donde se intenta razonar los resultados que genera el programa de elementos finitos para cada caso y se compara con los demás modelos, para observar cómo influye las condiciones geométricas y de contorno que se han asignado a cada caso.

Cabe mencionar que para la comparativa entre modelos siempre se ha asignado el mismo tipo de carga, tanto en magnitud como en posición, de esta manera se asegura que las diferencias que se generen, sean debidas a los factores con los cuales se están trabajando en la investigación de esta tesina.



## **2. ESTADO DEL ARTE**

Antes de empezar con los aspectos analíticos del estudio estructural, es importante que el lector entienda el concepto principal que se quiere desarrollar en esta tesina, de esta manera se asegura que todos los siguientes pasos. respecto al análisis estructural, se entiendan bien y se puedan observar con claridad las conclusiones de cada caso.

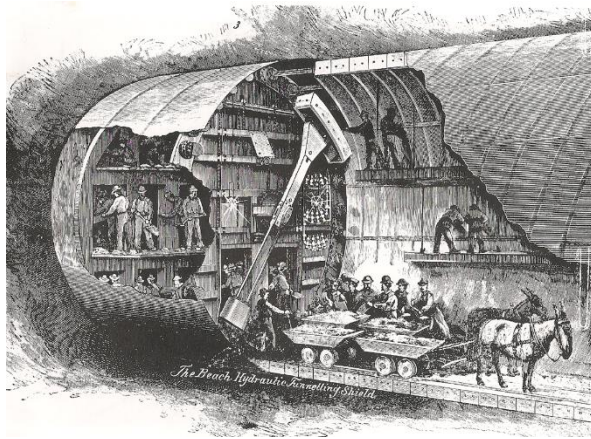
### **2.1 Introducción**

El concepto principal es la necesidad de la construcción de infraestructuras, para poder satisfacer a la sociedad, en referencia a la movilidad que se está generando en las últimas décadas.

Una de las más complejas y que más se está implementando últimamente, es la construcción de túneles, que permite desarrollar comunicaciones lejanas sin afectar las actuales vías de comunicaciones, permitiendo ampliar el abanico de posibilidades de transporte público.

Además, la construcción de estas infraestructuras no genera ningún tipo de impacto medio ambiental, que es un punto bastante importante a tener en cuenta cuando se está en la fase de estudio de alternativas. Dado que hoy en día, el medio ambiente es un tema primordial y que se intenta modificar lo menos posible, con la finalidad de que haya zonas naturales, donde la humanidad no haya tenido ninguna participación en ella.

En su forma más básica, un túnel es un tubo hueco a través del suelo o una piedra. La construcción de esta infraestructura es uno de los retos más complejos en el campo de la ingeniería civil. Algunos de los túneles existentes, son considerados obras maestras tecnológicas por su grado de dificultad a la hora de llevarlo a cabo.



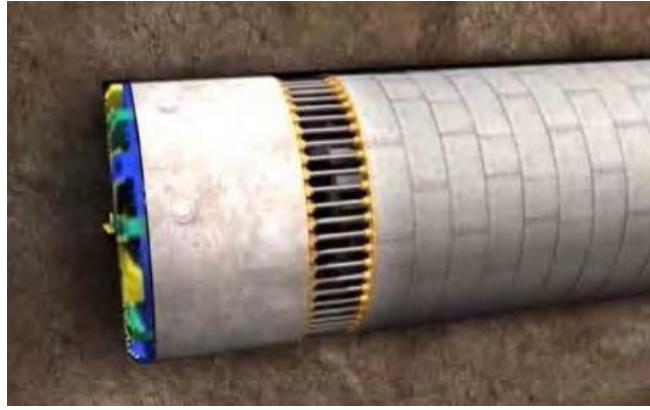
**Figura 1.** Construcción de un túnel en los tiempos pasados

La fase constructiva de estas obras lineales se puede llevar a cabo de varias formas, las más conocidas son las que se realizan mediante voladuras controladas y uniformes, que son especialmente utilizados en túneles cortos; y las que se emplean máquinas para la excavación a sección completa, que se denominan tuneladoras, se realizan en suelos de roca dura y en tramos de gran longitud. La gran diferencia entre estas dos, es la rentabilidad de cada proyecto, es decir, por norma general para tramos cortos se usarán explosivos mientras que la opción de la tuneladora tiene peso en obras de gran envergadura, debido a que el coste que deriva de la fabricación de la máquina es relativamente importante y se debe amortizar para que el proyecto sea rentable económicamente.

No obstante, cuando se trabaja en un proyecto como este, se debe tener en cuenta que el avance no se realizará sobre un único tipo de suelo a lo largo de toda su longitud, como consecuencia, resultará necesario más de un método de avance y soporte en la construcción para un mismo túnel.

En la presente tesina se enfocará hacia los túneles que se construyen mediante tuneladoras denominadas TMB (*"Tunnel Boring Machines"*), que permiten la excavación a sección completa del túnel, y simultáneamente la construcción de la estructura resistente, mediante revestimientos de elementos prefabricados de hormigón, denominadas dovelas.

Últimamente estas infraestructuras se suelen llevar a cabo en zonas urbanas, dado la complejidad de poder construir una nueva vía de transporte por debajo de una ciudad o zona que se encuentra equipada con la última tecnología y bien desarrollada, por lo tanto, la construcción más ideal para no afectar a la situación actual de estas ciudades, es la utilización de esta tipología de construcción.



**Figura 2.** Forma genérica de una TBM

## 2.2 Fases de construcción

Las fases de construcción mediante TBM son las siguientes:

- Transporte de la tuneladora hasta la obra
- Ejecución de pozo de ataque
- Montaje de la tuneladora e instalaciones auxiliares
- Ejecución del túnel
- Desmontaje

La fase de transporte de la tuneladora es bastante compleja, debido a que es una maquinaria muy sofisticada y de gran dimensión (normalmente son importadas de otras zonas) y, por lo tanto, se necesita transportarla por piezas desde la empresa, donde se ha fabricado, hasta el emplazamiento de la obra. En la mayoría de los casos, se requiere de vehículos especiales e incluso algún permiso especial para circular por las carreteras que se dirigen hacia la obra, como es evidente se necesita un gran espacio en obra para poder almacenar las piezas para su posterior montaje.



**Figura 3.** Acopio de los elementos prefabricados

La ejecución del pozo, es básicamente la realización de un pozo en el terreno donde se quiere empezar a excavar, por lo general, el pozo está formado por pantallas de hormigón que se encargan de retener el empuje del terreno que lo rodea. Esta actividad se realiza para poder colocar la tuneladora, donde empezará su trabajo de excavación.

Dentro del pozo se realiza una losa bien armada en forma circular para poder ubicar, tanto la tuneladora, con el escudo de corte, como el “*Back up*” que es donde se ubica el resto de maquinaria auxiliar que se encarga de extraer el material, que corta el escudo hacia fuera de las inmediaciones.

La fase de montaje de la tuneladora se realizará una vez se haya terminado la construcción del pozo, como se ha comentado anteriormente la tuneladora viene por partes e incluso, así, son elementos de gran peso y, por lo tanto, para poder llevarlos hacia el pozo para su posterior montaje, es necesario grúas de gran envergadura aproximadamente de 550 toneladas.

El elemento más pesado de una tuneladora, suele ser la motorización con un peso de aproximadamente 180 toneladas. Una vez montado el escudo se colocan los remolques que forman el “*Back up*”, simultáneamente se debe construir elementos auxiliares como una planta de hormigón; grúa torre para descarga de materiales; un pórtico de 125 toneladas para cargar las dovelas en los vagones, que las llevarán hacia dentro de la tuneladora para su posterior colocación; naves de taller y almacenes, donde se guardarán todos los elementos estructurales contruidos en las naves.

Un elemento fundamental, al inicio de la excavación es la estructura de reacción, que es un elemento metálico, que sirve de apoyo al inicio de la excavación, dado que, al inicio del avance de un túnel, la maquinaria que avanza no tiene ningún soporte para transmitir las fuerzas que están generando los gatos hidráulicos en la fase de avance. Esto solo es necesario al inicio del proyecto porque cuando se monte el primer anillo mediante dovelas, este servirá como base de apoyo para conseguir avanzar hacia adelante.



**Figura 4.** Montaje de la cabeza de corte

La ejecución del túnel consiste básicamente en excavar el terreno mediante una cabeza de corte con un diámetro 9,70 m (este número es solo para tener una referencia de magnitud dado que cada proyecto es un caso diferente) que gira sobre un eje, que es propulsado por varios motores instalados en el “*Back up*” y que deben poseer una fase de refrigeración para su buen funcionamiento. El giro de la cabeza de corte suele rondar de 0 a 2,40 revoluciones por minuto, esto dependerá de las condiciones del terreno, en cuanto a la fuerza del par de los motores pueden llegar a 2.000 toneladas en el modo desbloqueo, que se intentará usar lo menos posible, solo en casos excepcionales.

A medida que se va excavando el terreno, este se va derrumbando y pasa a una cámara de excavación y mediante una cinta transportadora es extraída hacia el exterior. Por lo general, el avance de la excavación depende de los gatos, que se apoyan sobre las dovelas ya construidas y pueden ejercer una presión de 8.000 toneladas en modo avance e incluso hasta 10.000 toneladas en caso de que el terreno presente unas condiciones muy desfavorables que pueda ocasionar el bloqueo de la tuneladora.

La disposición de los gatos dependerá de cada proyecto, el caso particular que se estudiará en esta tesina, está formado por 19 gatos hidráulicos, 3 gatos por dovela y un gato en la dovela llamada *Clave*, que se puede ver sus características en el apartado de metodología. Normalmente, se dividen por sectores la fuerza ejercida por los gatos, que suelen estar ubicados en la parte superior e inferior y en los laterales, la finalidad de la división de la fuerza

es para poder excavar cumpliendo el trazado del proyecto, debido a que el radio de giro que se suele emplear en este tipo de construcciones es mayor o igual a 300 metros.

Un claro ejemplo de la importancia de tener dividida la presión hidrostática es para corregir algún desvío, que se puede producir durante la ejecución, la solución más evidente es ejercer presión solo en la zona que se quiere corregir el desvío del trazado.

Cuando se realiza una cierta distancia de avance se procede al revestimiento del anillo, mediante dovelas prefabricadas, por lo tanto, el anillo de 1,60 m de ancho estará formado por 7 dovelas con tres tipologías diferentes, estos últimos datos son referentes al proyecto que se está analizando en la presente tesina. El análisis estructural de cada dovela individual será analizado en los apartados próximos.

Siempre quedará una cierta distancia, de aproximadamente de 15 cm, entre la excavación que realiza la cabeza de corte y el anillo formado por las dovelas, dicho hueco será rellenado mediante mortero, que es inyectado por 4 puntos diferentes a medida que se va excavando.

Una de las funciones que realiza esta inyección es la de evitar asentamientos y la más trascendente es la de impermeabilización de la estructura, que es un grave problema que suelen sufrir estas estructuras, y que mediante esta investigación se ha podido descubrir una posible causa del porqué suelen aparecer estos problemas.

La colocación de las dovelas se realiza mediante máquinas apropiadas, para que la tolerancia de error sea la mínima posible, la ubicación de las dovelas en el anillo se hacen siempre dentro de la tuneladora y nunca en contacto directo con el terreno excavado por temas de seguridad.

Una vez colocadas, se debe realizar un confinamiento en las dovelas, para garantizar que estén en su sitio y reducir los riesgos de caída de estos elementos, sobre todo las que están situadas en la parte superior del anillo, también se suelen atornillar entre dovelas y anillos anteriores ya contruidos.

Mientras se va excavando, el “*Back up*” va realizando sus funciones, de las cuales las más importantes pueden ser: proporcionar dovelas, hormigón y extraer el material que se va excavando en el trazado.



**Figura 5.** Vista general del Back up

Cuando se termina la fase de excavación, es decir, cuando la cabeza de corte llega al siguiente pozo, se suele introducir unos cuantos metros la tuneladora en el pozo de llegada y empieza el proceso de desmontaje de la tuneladora.

### 2.3 TBM

Como se ha comentado en el apartado anterior, el método de excavación mediante tuneladora se puede realizar por varios métodos, en esta tesina se centrará en la “*Tunnel Boring Machine*” que emplea un disco corte en la parte frontal de la máquina para su posterior avance. Este tipo de excavación se realiza a sección completa y simultáneamente se procede a la colocación de dovelas para soportar el peso del terreno.

El rendimiento que se consigue con la TMB en comparación con los métodos tradicionales son bastante notables, cabe destacar que para emplear este método es necesario tener una longitud mínima de trazado, para su viabilidad económica debido al alto coste de la tuneladora.

Dentro de esta tipología se puede diferenciar varios tipos de metodologías que variarán en función de las condiciones de cada proyecto. Generalmente se suele dividir en dos grupos: uno para suelos blandos y otro para suelos de roca dura.



Las TBM que se emplean en suelos de roca dura están diseñadas para excavar terrenos de roca dura sin necesidad de emplear soportes. La fuerza de empuje se transmite en el cabeza de corte del TBM por medio de cilindros de avance y la reacción es proporcionada por elementos laterales, llamados pinzas que empujan el suelo en dirección radial, estos mecanismos de fricción aseguran una reacción adecuada para que la tuneladora avance.

El problema en esta tipología viene cuando el suelo no es lo suficiente resistente, como para soportar las fuerzas radiales y de colapso, por este motivo normalmente se emplean un sistema de protección de revestimiento.

En cambio, las tuneladoras que se suelen usarse para terrenos blandos requieren de un sistema de soportes. Los escudos que se introducen en la tuneladora están hechos de una carcasa metálica exterior, que sostiene provisionalmente el suelo desde el frente que avanza hasta un par de metros, donde se ubicará el soporte definitivo mediante elementos prefabricados. Este tipo de TBM son capaces de trabajar bajo el nivel freático que es un factor importante a tener en cuenta a la hora de escoger una tipología de tuneladora.

## **2.4 Dodelas prefabricadas**

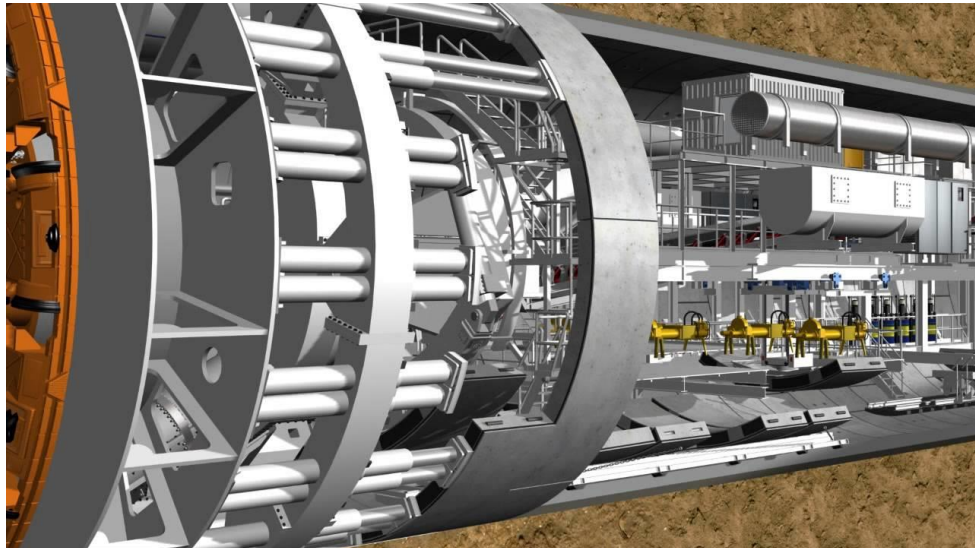
En la presente tesina se está estudiando el efecto estructural de los elementos prefabricados de hormigón, que se emplean en la construcción de túneles.

Las dimensiones y características de los segmentos prefabricados dependerán de varios factores como, por ejemplo: las condiciones de contorno, el espacio libre para su colocación, el medio para ser transportadas, la extensión máxima disponible de los gatos hidráulicos.

Normalmente se intentan dimensionar lo más grande posible para tener la menor cantidad de elementos para un anillo, de esta manera se facilita el trabajo de la tuneladora y también se consigue aumentar un poco el rendimiento en la fase constructiva.

Se pueden distinguir dos tipos de soportes un primario y un secundario; el primero de todos proporciona un soporte temporal o definitivo y garantiza la estabilidad del túnel en la construcción, manteniendo los asentamientos superficiales en los límites tolerables; el objetivo del soporte secundario es la de proporcionar el rendimiento correspondiente a largo plazo, que básicamente consiste en colocar hormigón en los segmentos reforzados prefabricados, pudiendo incluso tener la misma resistencia a la compresión y las características geométricas del soporte principal.





**Figura 6.** Esquema gráfico de la colocación de las dovelas mediante TBM

Las dovelas prefabricadas se usan como elementos de soporte primarios en túneles construidos con TBM en suelos blandos (que es el caso que se está estudiando en la presente tesina).

Dichos elementos proporcionan buenas condiciones de soporte y al mismo tiempo unos acabados realmente satisfactorios, a medida que la tuneladora avanza se va colocando el grupo de segmentos prefabricados que forman un anillo del túnel.

Gracias a las nuevas tecnologías la TBM más moderna, posee montadores de segmentos prefabricados que eliminan las restricciones del tamaño asociado al peso de los segmentos prefabricados. Esto permite pasar de una construcción en capas a un solo anillo como soporte final, pudiendo construir el túnel en una sola fase.

El escudo de excavación se encarga de la colocación de cada dovela en su posición correcta, de manera automatizada y precisa. El constructor de los segmentos prefabricados se encarga de colocar los segmentos en la posición final. Primero, se coloca en la tecla del contador, después se coloca en el lateral de este segmento los otros elementos prefabricados, terminando el anillo con la última pieza denominada Clave.

La Clave es el segmento más pequeño y con una geometría bastante diferente al resto de dovelas, y es la última en colocarse al construir un anillo, formando así una sucesión de anillos hasta formar el túnel entero.

Un tema importante a la hora de formar el anillo mediante estos elementos prefabricados es el tema de impermeabilización, debido a que es difícil conseguir un sellado efectivo entre segmentos prefabricados.

En los primeros túneles construidos, se colocó una cuerda de alquitrán entre cada segmento prefabricado para sellar temporalmente las juntas y retener la lechada de cemento del relleno parcial. Las juntas entre los elementos se sellaron más tarde con mortero o con un material similar después de la finalización del túnel.

A medida que pasaron los años este método fue substituido por juntas hidrofílicas permanentes, que se instalaron en la ranura del segmento prefabricado, que se hizo para este propósito.

La solución actual consiste en colocar juntas de goma o elastoméricos que funcionen bajo presión y garanticen la impermeabilidad. No obstante, cabe destacar que todavía existen varios problemas pendientes por resolver, como el comportamiento de las juntas en las juntas cruzadas, la pérdida de compresión a lo largo del túnel debido al efecto de arrastre y los daños durante el montaje, hay casos especiales donde se suele montar un sistema con doble juntas, para hacer más efectivo la impermeabilización.

Otro gran problema, a tener en cuenta, cuando se emplean elementos prefabricados, en la constitución de anillos que conforman un túnel, es que no se pueden considerar como un anillo continuo debido a la existencia de las juntas. Por lo que es necesario tomar en cuenta la influencia de las juntas en el cálculo de las fuerzas internas y los desplazamientos en el anillo.

Por lo tanto, en el diseño estructural de túneles, es de especial interés el estudio de los factores que inducen los esfuerzos en el túnel y que pueden causar la falla del mismo.

Además del comportamiento momento-rotación de las juntas entre dovelas, es necesario tener en cuenta, el comportamiento carga-deformación de las juntas entre anillos, el cual está directamente relacionado con el efecto de la carga axial dada por el empuje de la TBM.

## **2.5 Conexiones**

La unión de elementos individuales, para formar una estructura compleja, es esencial e importante para que su funcionamiento sea el adecuado. Por lo tanto, en la construcción de túneles se emplean conexiones que unen dovelas individuales entre sí y, otras que unen anillos sucesivos, para finalmente obtener como resultado final una obra lineal, denominada túnel.

La definición de las propiedades mecánicas de estos elementos, que será un dato importante para la fase de modelaje, es relativamente complicada de obtenerlas; debido a que su comportamiento estructural depende de muchos factores, donde la mayor parte de ellos,

conlleven ciertas incertidumbres. Por lo tanto, en esta tesina se utilizarán valores genéricos para definir sus características físicas, dado que es muy difícil concretarlas con precisión.

Es necesario tener en cuenta la influencia de estas en el cálculo de las fuerzas internas y los desplazamientos en el anillo. Se debe garantizar que las juntas mantengan la estanqueidad, sobre todo a largo plazo, y que el anillo resista los empujes del suelo sin deformaciones excesivas y si fallas estructurales.

En estas obras lineales se distinguen dos tipos de conexiones: unas juntas longitudinales, que se encargan de unir las dovelas individuales y unas juntas circunferenciales, que sus funciones principales son de unir anillos sucesivos.

En los sistemas modernos de endovelado se han mejorado sustancialmente los sellos para impermeabilizar las conexiones transversales y longitudinales; así como también se han modificado las conexiones entre dovelas y entre anillos, de modo que la transmisión de esfuerzos se realiza por contacto directo entre las superficies de hormigón, sin conexiones atornilladas adicionales. De esta forma, se confía en la presencia de fuerzas axiales importantes para asegurar la continuidad entre los distintos elementos del revestimiento.

En el diseño estructural de túneles es de especial interés el estudio de los factores que inducen los esfuerzos en el túnel, y que pueden causar el colapso de la estructura. Entre estos se pueden destacar los siguientes:

- El comportamiento mecánico de las juntas entre dovelas.
- El número de juntas y su posición relativa con respecto a las cargas.
- La relación entre las cargas verticales y horizontales que actúan sobre el túnel.

De varios estudios realizado sobre el comportamiento estructural de las juntas, se pueden destacar los siguientes aspectos:

- Conforme aumenta el número de juntas en un anillo, el momento flector y las fuerzas actuantes en las dovelas decrecen.
- Existe un número crítico de juntas, después del cual, si se sigue aumentando el número de juntas, no existe una disminución significativa del momento flector.
- La orientación de las juntas es un factor determinante en el nivel de esfuerzos presente en el anillo.
- La rigidez a rotación de la junta depende de las cargas actuantes en ella. La rigidez disminuye cuando se incrementa el momento flector y si incrementa al aumentar las fuerzas axiales.

- Para el caso de juntas con pernos, la rigidez a rotación de la junta se incrementa cuando hay un incremento en el presfuerzo aplicado a los pernos.
- El momento máximo resistente positivo es mayor que el negativo, para el caso de juntas con pernos excéntricos. En algunos casos, esta diferencia puede ser de hasta seis veces.
- El comportamiento mecánico de la junta no sólo depende de su geometría y del material de las dovelas, sino que también depende de las cargas aplicadas y del tipo de conexión usada: con pernos, con juntas de contacto...

Todo esto implica que un buen conocimiento de las juntas permitirá realizar modelos numéricos más representativos de la realidad. A continuación, se muestra una ilustración donde se puede ver dichas juntas.



**Figura 7.** Juntas circunferenciales y longitudinales

## 2.6 Tipologías de anillos

Para formar los anillos que forman un túnel se pueden conseguir de varias formas, empleando un anillo trapezoidal o un anillo universal.

La primera tipología de anillo trapezoidal, fue creada por la necesidad de mejorar la estanqueidad del sistema de revestimiento y la substitución de juntas hidrófilas, utilizadas anteriormente por juntas de goma.

Con la nueva incorporación de juntas era necesario cambiar la forma de la dovela, de recta a trapezoidal, debido a la necesidad de deslizar y colocar cada dovela en su lugar definitivo, antes de que las juntas entraran en contacto.

Por lo tanto, la nueva forma trapezoidal de la dovela permite que las juntas no entren en contacto hasta que los orificios de cada perno de las dovelas no estén completamente alineados.

En las primeras construcciones con este tipo de anillo solo hacían falta 6 dovelas trapezoidales idénticas, pero una de las desventajas de esta forma de construir el anillo, apareció en la fase de construcción.

Dado que cuando se empieza a formar la estructura circular con una dovela contrallave, la secuencia de construcción requiere la colocación de una dovela llave a ambos lados del primer elemento colocado. Esta nueva forma constructiva dificulta la compresión de todas las juntas que conlleva a no garantizar la estanqueidad del revestimiento para hacer frente al agua.

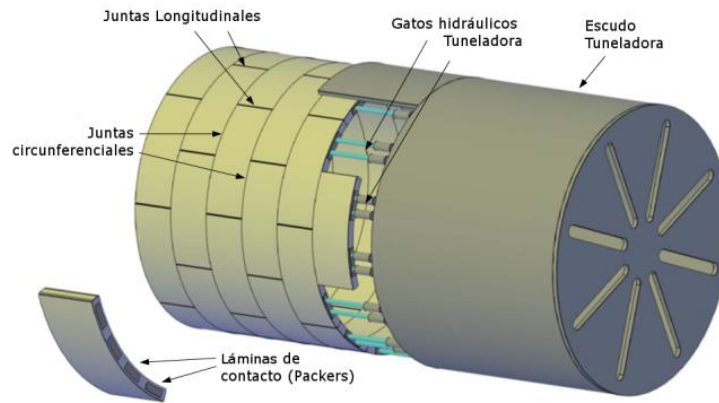
En referencia a la segunda tipología de anillo, denominado anillo universal con dovelas cónicas, se intentó resolver varios problemas que representaba el anterior método.

Esta nueva forma de construir un anillo, consiste en dos segmentos una llave trapezoidal y un número determinado de segmentos laterales romboides para hacer que el anillo quede completamente cerrado.

En el anillo universal cabe destacar la gran ventaja que genera en el proceso de construcción, que siempre se empieza a construir los anillos con la misma dovela.

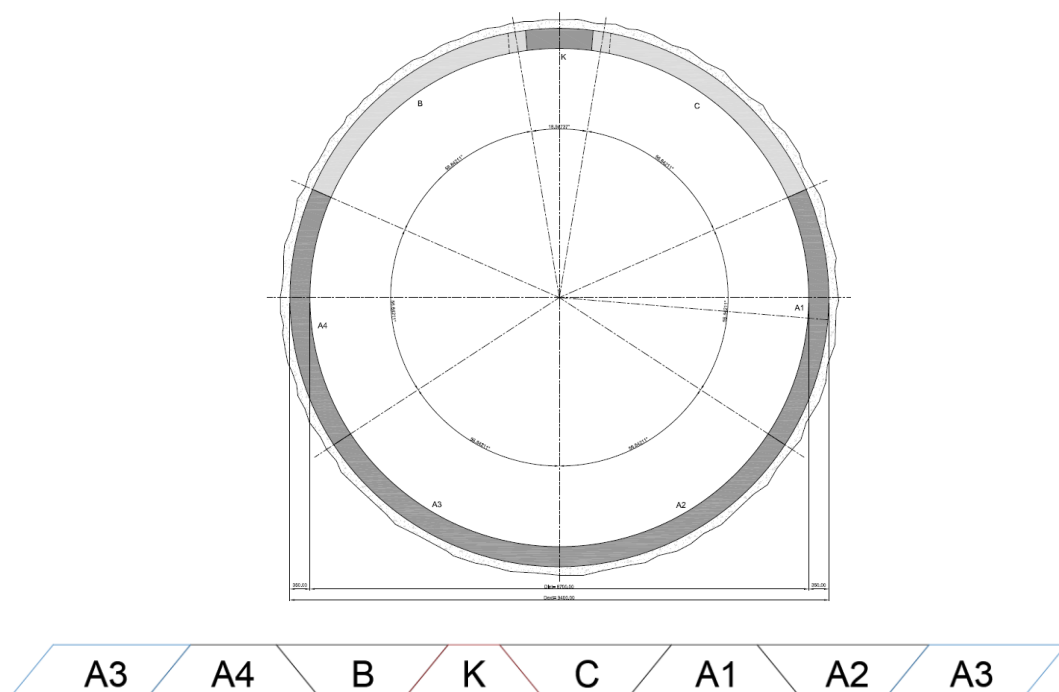
La colocación de la primera dovela dependerá de la orientación que exija la forma cónica del anillo, por lo tanto, puede estar ubicada en cualquier punto alrededor del anillo.

En la siguiente figura se puede apreciar un esquema resumen de los conceptos más importantes que el lector debería tener en cuenta para poder entender e interpretar correctamente los siguientes apartados.



**Figura 8.** Conceptos fundamentales para la presente tesina

En este trabajo de investigación se estudia un caso que está formado por un anillo que consta de dovelas trapezoidales y una dovela paralelográfica que se encarga de cerrar la geometría en un anillo completo, cabe mencionar que como en el resto de anillos también se incorpora la dovela denominada Clave; dicha dovela que cierra el anillo puede adoptar 19 posiciones diferentes, por lo tanto, su posicionamiento dependerá de las condiciones geométricas y mecánicas que requiera el proyecto en cada tramo de su recorrido. A continuación, se muestra la distribución de un anillo entero por segmentos, que corresponde a las dovelas prefabricadas que serán analizadas en los siguientes apartados.



**Figura 9.** Desglose del anillo del túnel a analizar

## 3. METODOLOGÍA

En este apartado se describirá con detalle la metodología, con la cual se ha llevado a cabo todos modelos analizados en la presente tesina. Además, se podrá apreciar que cada caso tiene sus peculiaridades y detalles, que marcan la diferencia entre los diversos casos, que posteriormente serán comparados entre ellos.

### 3.1 Introducción

Antes de empezar, se debería recalcar que la utilización de elementos finitos es solo una herramienta para obtener una aproximación de la realidad física. Por lo tanto, los resultados que se obtengan del Sap2000, han de ser analizados con mucha cautela y verificar que las salidas de datos sean coherentes con las condiciones de contorno que se hayan impuesto.

Acorde con cualquier problema ingenieril que emplea programas de elementos finitos para buscar una solución aproximada a la real, los pasos a seguir son más o menos iguales; donde básicamente se intenta proporcionar al programa, una aproximación de las propiedades mecánicas de los elementos estructurales que forman parte del problema en cuestión.

A continuación, se detalla de manera rigurosa las fases principales que se debe seguir, cuando se está tratando de modelizar un elemento estructural mediante elementos finitos:

- Definir la geometría del caso a analizar
- Asignar las características mecánicas de la estructura
- Definir las cargas que se aplicarán sobre los elementos estructurales
- Definir las condiciones de contorno de la geometría
- Definir las combinaciones pertinentes

Los pasos anteriores servirán de base para todos los modelos, que se realicen a lo largo de esta investigación. El concepto general de la presente tesina es la de modelizar casos simples y una

vez se haya determinado que dichos casos funcionan correctamente, proceder a realizar casos más complejos.

De esta forma, si hubiese cualquier error en la modelización, se podría detectar de manera muy fácil en que zona o aspecto se está cometiendo el error, que hace que los resultados que genera el programa sean totalmente incoherentes con la realidad.

En este trabajo de investigación se ha decidido estudiar el comportamiento estructural de un túnel genérico, que ha sido diseñado para resistir las cargas que genera el terreno y la presión hidrostática.

Por lo tanto, tal como se ha comentado anteriormente, se dividirá la estructura en modelos simples y, de esta manera, poder observar el comportamiento estructural de cada elemento que forma parte del túnel.

Los elementos en cuestión se denominan dovelas prefabricadas, que han sido estudiadas teniendo en cuenta dos tipos de condición de contorno (articulada y empotrada). Por consiguiente, se podrá observar la influencia que conlleva emplear un determinado apoyo u otro. Además, también se podrán observar los diferentes comportamientos estructurales que existen en función de la geometría de cada dovela.

Una vez se haya realizado un análisis profundo y verificado que todos los elementos individuales se comportan de manera correcta, se procede a la modelización de un anillo, formado por diferentes tipologías de dovelas.

En el estudio que se realiza sobre un anillo, de un túnel, también se tiene en cuenta dos casos diferentes, que dependen según el tipo de condición que se imponga, entre medio de cada dovela individual.

También se realizará sus pertinentes comparaciones entre ambos modelos, tal como en los casos individuales. En el caso de que el modelo, formado por un anillo, funcione se puede proceder a la generación de un modelo más complejo, que en este caso sería el que está formado por 2 anillos y, así sucesivamente, hasta llegar al modelo más complejo que se haya modelizado en esta tesina, que es la modelización de un túnel con 3 anillos.

Cabe remarcar que todos los casos tienen sus peculiaridades que serán explicadas con detalle en los apartados correspondientes a cada uno de los casos en cuestión.

Por último, se ha realizado un estudio de la influencia que puede tener la fuerza de los gatos hidráulicos en el comportamiento estructural del túnel analizado.



En todos los casos, se intentan obtener resultados que puedan ayudar al análisis estructural de esta tipología de estructura. Así, se podrá determinar qué tipo de geometría sería la más idónea para la ejecución de un túnel con unas características genéricas.

Además, se podrá observar las diferencias, a nivel estructural, de cómo influirá el hecho de emplear un tipo de condición de contorno u otro, que desde el punto práctico sería un gran avance, en el estudio sobre el comportamiento estructural de las dovelas prefabricadas, empleadas en la construcción de túneles.

Respecto a los resultados que se emplearán a modo de comparación entre modelos, serán sus respectivas deformaciones, rotaciones y sus estados tensionales. La comparativa que se realice proporcionará que geometría es la óptima para este tipo de problema estructural.

A modo resumen, se puede apreciar a continuación un esquema simple de los pasos que conlleva la realización de la presente tesina:

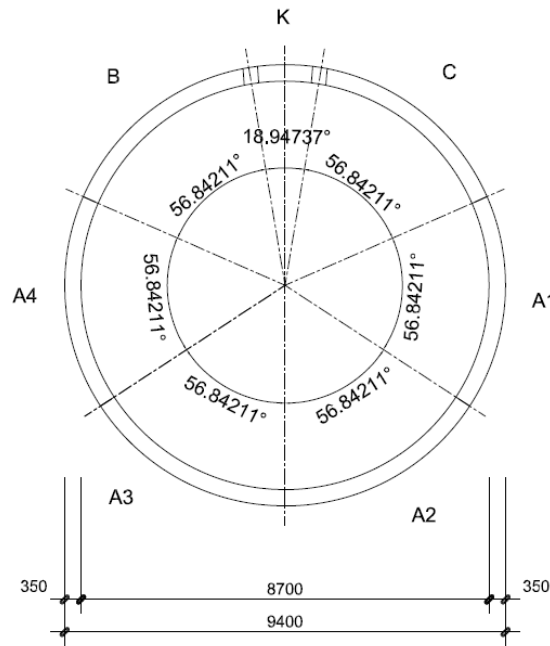


### 3.2 Geometría

El problema que se plantea es el de analizar una estructura tridimensional mediante elementos finitos. Las dimensiones que se emplearán para la modelización, serán extraídas de la geometría de un proyecto real que existe, que es considerada una aportación fundamental para poder dibujar la estructura en cuestión, mediante un programa de dibujo técnico (AutoCAD) y después, exportarla al programa Sap2000 para su posterior análisis.

Antes de empezar, se presentará la forma de la estructura que se pretende analizar, de esta forma, el lector puede entender mejor los pasos que se llevarán a cabo a lo largo de la tesina.

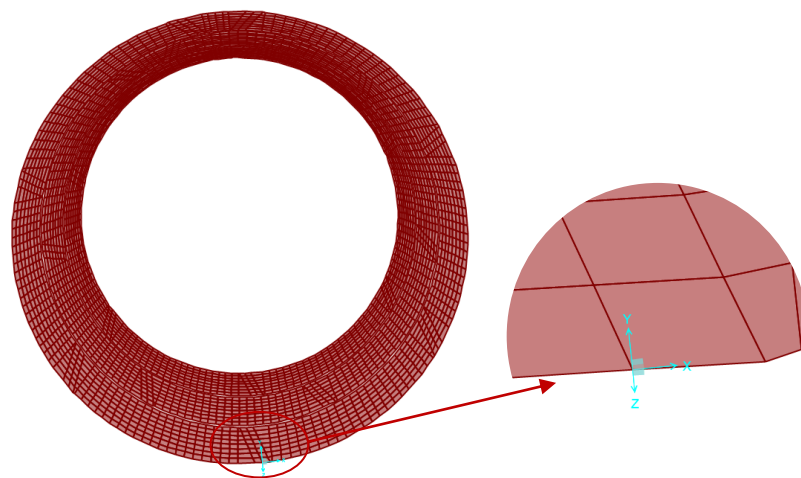
El anillo en cuestión está formado por 7 elementos con 3 tipologías diferentes denominadas dovela llave, dovelas trapezoidales y una dovela paralelográfica, esta última tiene la función de unir dos dovelas trapezoidales continuas que es fundamental para cerrar el anillo. En la siguiente ilustración se muestra un croquis de la estructura.



**Figura 10.** Croquis del anillo

Respecto a las dimensiones generales del anillo presente en la *figura 10* consta con un diámetro de 8,70 m y cada dovela individual, que forman parte del anillo, tienen un espesor de 35 cm y 1,60 m de ancho. Además, de la *figura 10* se puede observar los ángulos, en los que está dividido la sección del túnel, que se consideran de vital importancia a la hora de modelizar la estructura.

Respecto al modelo del programa Sap2000 todos los resultados que se generan están referenciados a los ejes que se muestra en la *figura 11*.



**Figura 11.** Orientación del túnel

La simple idea de que se esté tratando de simular un túnel, con unas geometrías reales, hacen que los resultados sean más verosímiles y al mismo tiempo poder contrastar con valores reales, debido a que el tutor de la tesina ha participado en la ejecución del túnel en cuestión.

Así, también resulta menos complicado razonar los resultados obtenidos, mediante un programa sofisticado. De esta manera se puede corroborar los resultados calculados mediante elementos finitos con la experiencia que tiene *Javier Ainchil* en este tipo de obras lineales.

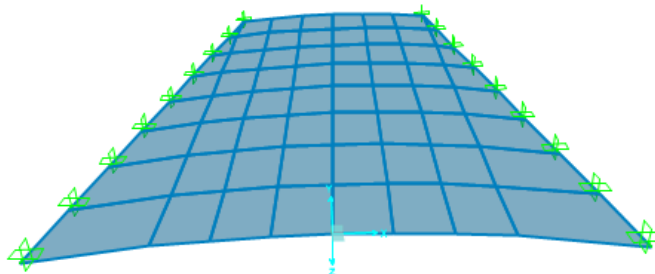
Esta investigación se enfocará a analizar diversos casos, que están formados por diferentes elementos, es decir, se modelizarán casos simples y complejos, todo esto dependerá según los resultados que se obtengan y la vía de análisis que se quiera seguir a lo largo de esta tesina.

Por lo tanto, primero se modelizará y analizará de manera individual las dovelas, y después, se unirán todas para formar un anillo entero que formará parte de un trozo del túnel. Al tratarse de una modelización en elementos finitos, cabe destacar que cada dovela estará constituida por elementos más pequeño, donde el ensamblaje de todos estos elementos proporcionará el comportamiento general de la dovela entera.

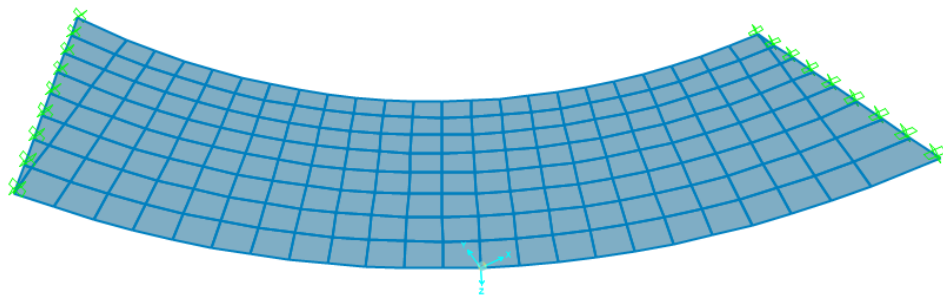
El efecto más importante en esta tesina es el del alabeo, que es una deformación que se produce fuera del plano que contiene la sección del anillo. Esta deformación se podrá observar en el modelado de un anillo entero, y por supuesto, se ha realizado dos modelos más para profundizar en el comportamiento de dicho efecto estructural.

A continuación, se puede observar la geometría de todos los casos que se emplearán a lo largo de esta investigación.

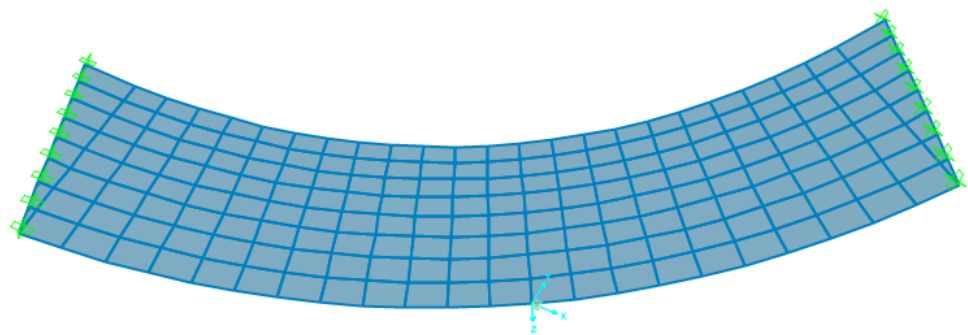
- **Dovelas individuales**



**Figura 12.** Dovela "Clave" empotrada



**Figura 13.** Dovela "Paralelogramo" empotrada



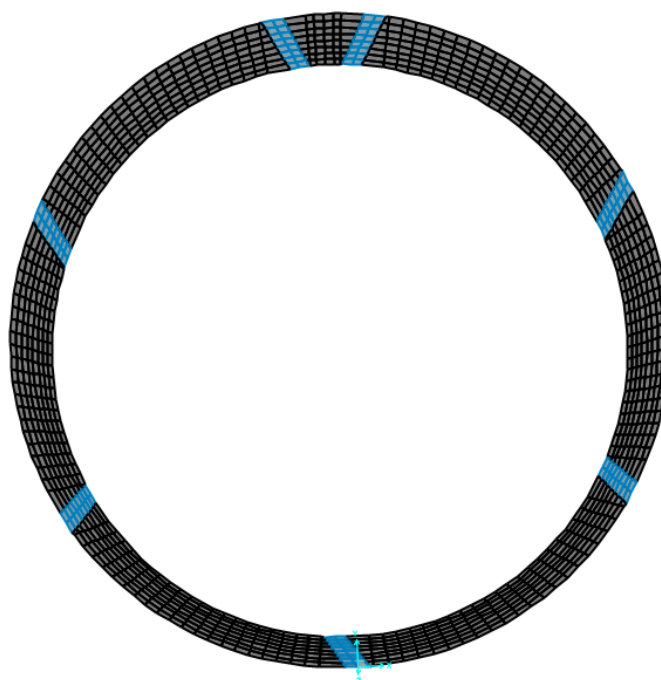
**Figura 14.** Dovela "Trapezoidal" empotrada

Como se puede observar de las figuras anteriores, cada elemento individual ha sido discretizado con un tamaño de malla óptimo, es decir, el coste computacional que se generará será relativamente razonable y en referencia al orden de magnitud de las aproximaciones numéricas, será bastante idóneo.

El tamaño de malla que se ha empleado, consiste en dividir aproximadamente toda la superficie de la estructura en cuadrados de 20x20 cm, en algunas zonas es difícil cumplir esta división, debido a la cierta inclinación que tienen los bordes laterales de las dovelas.

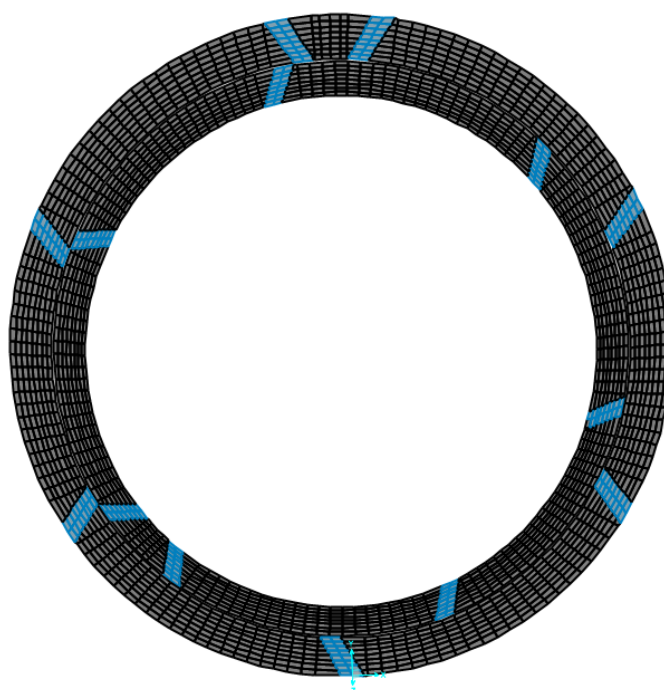
Se debe remarcar, que para la *figura 12* el sentido de la gravedad va en el sentido opuesto al eje Y, mientras que tanto para la *figura 13* como para la *14* la gravedad va en el sentido del eje Y. Esto es importante saberlo, para poder entender la salida de resultados en el apartado de análisis de cada elemento.

- **Un anillo del túnel**



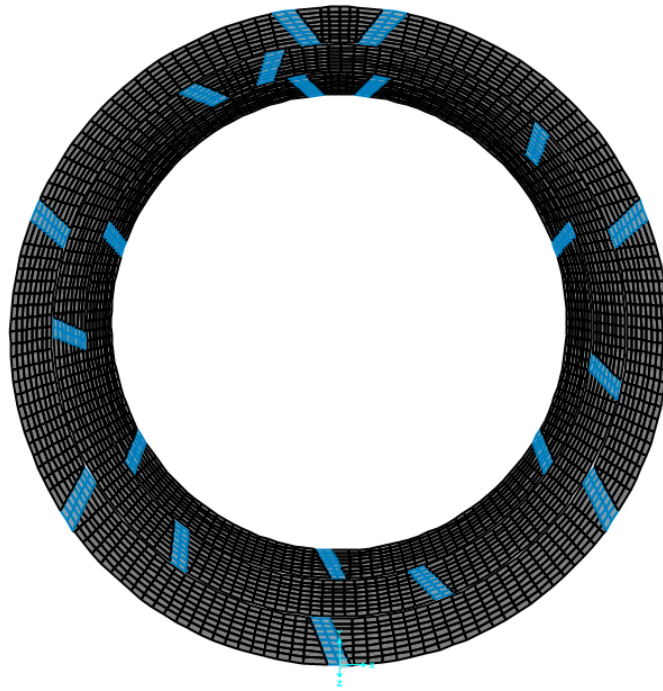
**Figura 15.** Un anillo formado con dovelas individuales

- **Dos anillos del túnel**



**Figura 16.** Dos anillos formados con dovelas individuales

- **Tres anillos del túnel**



**Figura 17.** Tres anillos formados con dovelas individuales

Cabe resaltar que las posiciones de las dovelas juegan un papel importante cuando se intentan modelizar 3 anillos consecutivos, en la *figura 17*, se puede apreciar que los tres anillos tienen una posición similar.

El anillo intermedio ha sido modelizado con un giro de 22 grados respecto a las claves de los anillos exteriores, para simular la situación más desfavorable, que se puede obtener en estas estructuras, debido a que cuanto más cerca estén las claves de los anillos más deformación sufrirá el túnel y mayores problemas de durabilidad y resistencia tendrán estas infraestructuras.

### **3.3 Características mecánicas**

Las propiedades mecánicas del material que se utiliza como simulación, tienen un peso considerable a la hora de obtener resultados, debido a que las deformaciones que se generan, siempre dependen de una matriz de rigidez de los elementos resistentes, y mediante dichas deformaciones se pueden obtener los esfuerzos y las tensiones sobre la superficie de la estructura.

En este caso, se ha designado como material de construcción un hormigón C50/60 que es el mismo que se utilizó en la construcción de la obra en cuestión.

A continuación, se podrá observar las características principales del hormigón empleado:

<i>Peso Específico</i>	24,52	KN/m <sup>3</sup>
<i>Fcd del hormigón</i>	50,00	Mpa
<i>Módulo de Elasticidad</i>	37.000,00	Mpa
<i>Coefficiente de Poisson</i>	0,2	-
<i>Módulo de Cortante</i>	15.416,67	Mpa

**Tabla 1.** Propiedades isotrópicas del hormigón

Una vez definidas las características del material, se deberá asignar sobre los elementos que soportarán las cargas externas. Estos elementos que se encargarán de formar el anillo pueden definirse por varios elementos finitos dentro del programa Sap2000.

Primero de todo, cabe destacar que el problema que se intenta solucionar se le puede caracterizar como un elemento discreto. Dado que estos sistemas discretos, pueden solucionarse empleando métodos de elementos finitos, para encontrar una solución aproximada a la realidad.

Por lo tanto, a la hora de modelizar la estructura en el programa es necesaria la selección del tipo de elemento finito, que más se puede adaptar a la realidad de las dovelas prefabricadas.

Como consecuencia, es necesario primero conocer las características de cada elemento finito en 3d, que proporciona el programa Sap2000 para una posterior elección, que será la encargada de simular una dovela prefabricada dentro del programa.

Los más comunes son los siguientes:

Placas delgadas y gruesas, se define como placa al sólido paralelepípedo en el que una de sus dimensiones (espesor) es mucho más pequeño que las otras dos, esta última expresión podría describir, casi a la perfección, las dovelas excepto por la curvatura que presenta un problema extra en la formulación de este tipo de estructuras.

Además, estos elementos deben garantizar la continuidad C1 debido a la presencia de derivadas segundas de la flecha en la expresión de los trabajos virtuales que se emplean para resolver el problema.

Otro problema a tener en cuenta, es que esta teoría de placas solo permite actuar cargas exteriores como fuerzas normales al plano medio y momentos cuyos ejes están contenidos en dicho plano.

En resumen, tanto el método de placas delgadas como gruesas no se pueden aplicar al problema que está intentado resolver en esta tesina.

Por lo tanto, se buscará otro tipo de elemento que pueda satisfacer las condiciones que plantea este tipo de estructura.

El elemento que más se adapta a la tipología de túnel son las láminas con elementos planos, son láminas que se pueden considerar una generalización de las placas, al caso de superficies media no plana. Es precisamente, esta no coplanaridad la que confiere el carácter resistente de las láminas, al permitir la aparición de esfuerzos axiles que juntamente con los de flexión, contribuyen a dotar a las láminas de una capacidad portante muy superior al de las placas.

Parece intuitivo, que la aproximación de la geometría real será más exacta cuanto más pequeño sea el tamaño de la discretización utilizada. Por lo tanto, se intentará discretizar de la mejor manera, cada elemento que forma el anillo, para obtener unos resultados óptimos. Obviamente, el coste computacional es otro factor a tener en cuenta cuando se está discretizando la estructura en cuestión, siempre se intentará discretizar lo máximo posible pero también teniendo en cuenta que el tiempo de cálculo sea razonable.

Esta metodología es de gran interés, no sólo para estudiar de forma aproximada las láminas de superficie media curva, sino también como método natural de análisis de numerosas estructuras laminares ensambladas en el espacio, que correspondería a las dovelas prefabricadas que forman un anillo del túnel.

### **3.4 Tipologías de cargas**

Las cargas que se tendrán en cuenta, se dividen básicamente en dos grupos; cargas radiales y unas cargas reales, que se explicarán a continuación sus diferencias y en qué casos se emplearán. No obstante, también se debe tener en cuenta, como un grupo adicional la introducción de las fuerzas de los gatos hidráulicos, que es el último caso de estudio que se presenta en esta tesina.

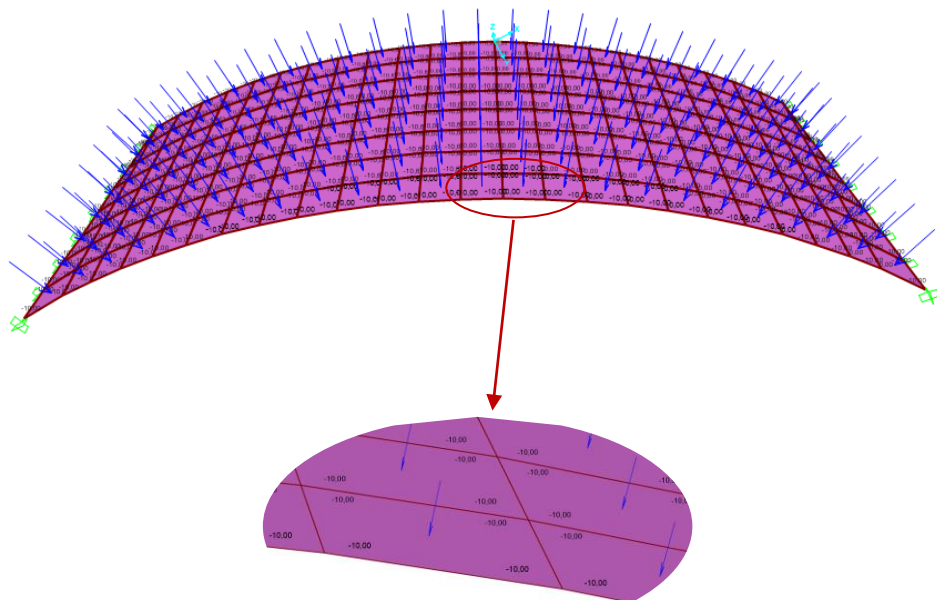


### 3.4.1 Cargas Radiales

Son cargas radiales que equivalen a la fuerza del peso propio del terreno, a una profundidad de dos anillos del túnel a analizar. Esta tipología se utilizará para los casos más simples, es decir en las dovelas individuales para poder observar el comportamiento de los elementos individuales, frente a una carga relativamente simple de entender sus resultados.

Esta fase resulta muy útil para poder observar que el modelaje de los elementos individuales, se comporte bien y así poder llevarlos a cabo a un problema más complejo, que es la modelización del anillo entero.

A continuación, se puede apreciar de manera gráfica, en magnitud y posición, las cargas radiales que están aplicadas sobre los elementos estructurales individuales.



**Figura 18.** Carga radial sobre la estructura  $10 \text{ kN/m}^2$

### 3.4.2 Cargas Reales

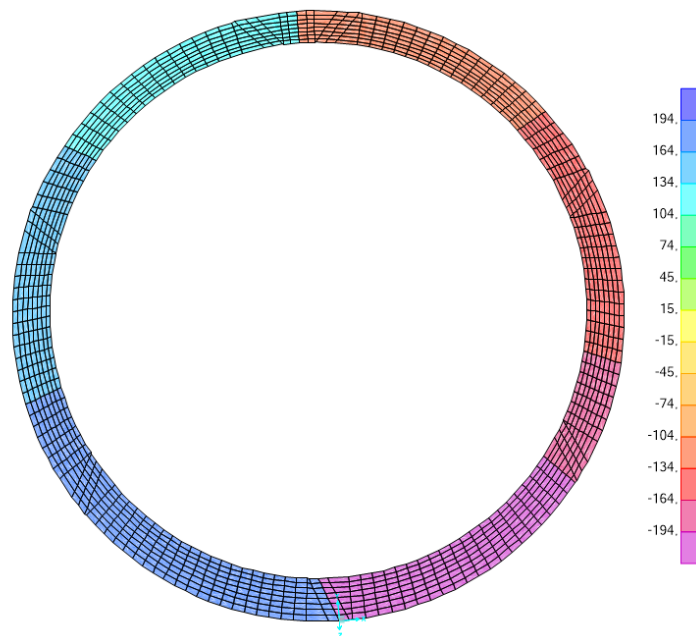
Para este grupo se consideran cargas reales, la combinación de las cargas principales que debe resistir cualquier túnel, que son las cargas que genera el terreno, debido a que la construcción de estas obras viales se produce a un cierto nivel de profundidad, respecto la superficie exterior y en la mayoría de los casos también se debe tener en cuenta la presión hidrostática, debido al nivel freático que se puede encontrar durante el trazado de la infraestructura.

El valor y la dirección de las cargas mencionadas, se pueden apreciar de manera gráfica en la parte inferior de este subapartado. Los datos de estas cargas han sido proporcionados por el tutor esta tesina, dado su gran experiencia laboral en este sector, se está modelando tanto la geometría como las cargas, lo más similar a la vida real. Esto conlleva a obtener unos resultados bastante aproximados a la realidad física, y no que sea una simple aproximación numérica.

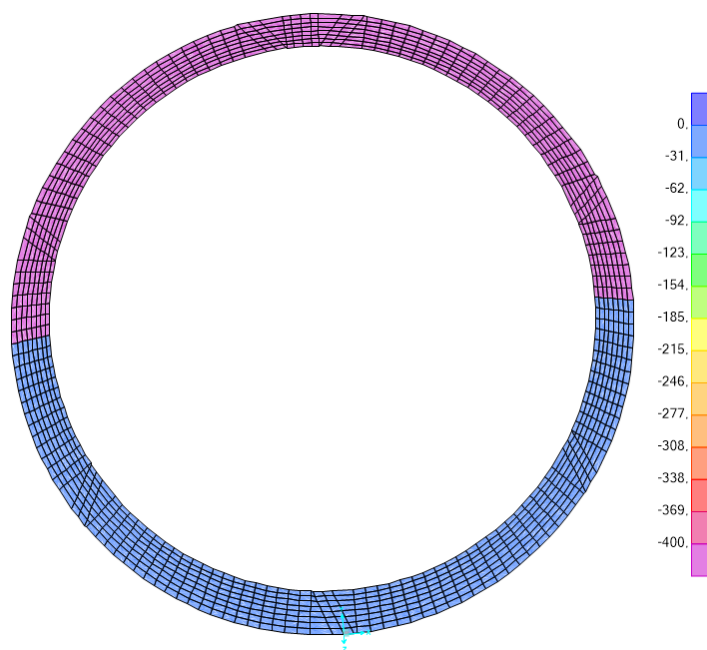
Los valores de las cargas del terreno sobre las dovelas, han sido obtenidos teniendo en cuenta que el túnel se encuentra dos veces su diámetro por debajo del suelo. Para simplificar resultados se ha impuesto una profundidad de 20 m y se ha considerado que el nivel freático se encuentre a 10 m por encima del túnel.

Todos estos valores de cargas se han introducido en forma de franjas en el programa, para poder simular lo máximo posible el esquema estático de cargas que se genera sobre la estructura del anillo del túnel, en las siguientes figuras se puede apreciar los valores de cada tipología de carga y su posicionamiento de aplicación sobre las dovelas.

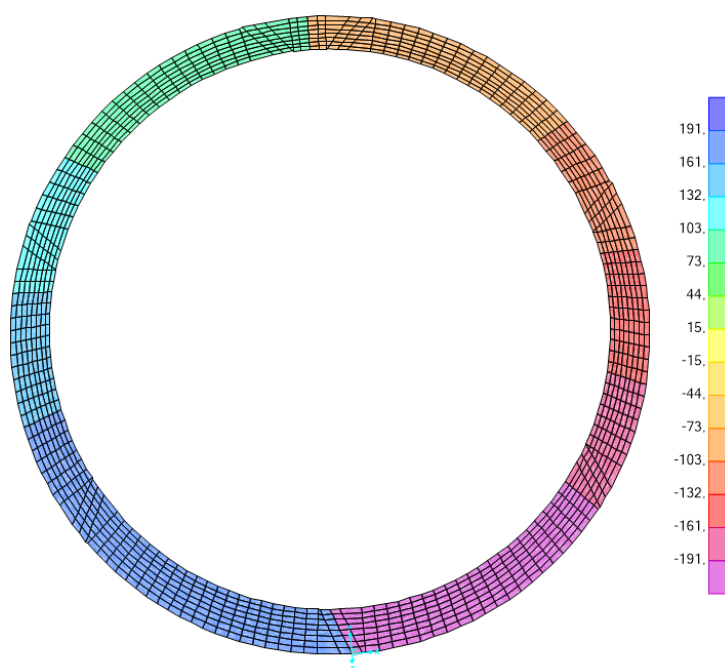
Este grupo de cargas se emplearán obviamente en las secciones enteras, es decir, en anillos completos para simular que la estructura está a un cierto nivel de profundidad. El análisis estructural, se ejecutará mediante la combinación en estado límite de servicio entre las cargas del terreno, del agua y el peso propio de los elementos que forman la estructura.



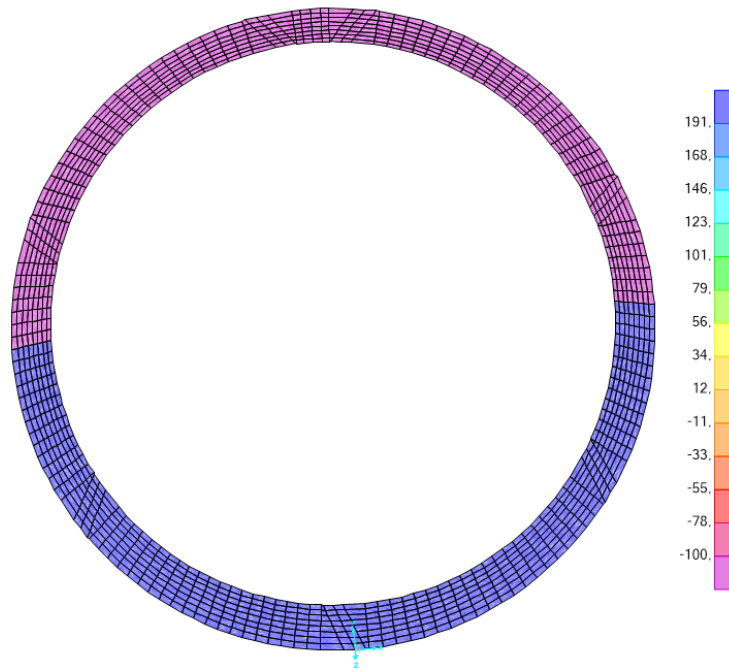
**Figura 19.** Carga de la presión de tierra proyección X (KN)



**Figura 20.** Carga de la presión de tierra proyección Y (KN)



**Figura 21.** Carga de la presión de agua proyección X (KN)



**Figura 22.** Carga de la presión de agua proyección Y (KN)

Se debe remarcar, que las cargas debidas al peso propio no se han mostrado gráficamente porque el programa las tiene en cuenta automáticamente y, por lo tanto, no es necesario introducir ningún dato extra respecto a este aspecto.

### 3.4.3 Fuerza de los gatos hidráulicos

La fuerza de los gatos hidráulicos, se modelizará como fuerzas puntuales repartidas de manera uniforme, a lo largo del diámetro del anillo. Esta nueva tipología de carga, que se debe tener en cuenta en esta investigación, representa la acción de avance de la tuneladora.

Dependiendo de la magnitud de esta carga, puede generar aspectos positivos y negativos en la construcción de un túnel, es decir, el valor de esta carga dependerá básicamente de la resistencia del terreno.

Cuando un terreno es muy blando, se empleará menos fuerza que en un terreno de roca dura. Obviamente el problema que más se presenta, es cuando se intenta construir un túnel en una zona de terreno blando y saturado, esto conlleva a que la fuerza de los gatos sea muy pequeña, por las condiciones que le rodea, y hace que al avanzar en la construcción no se sellen del todo las juntas circunferenciales entre anillos y que genere problemas de durabilidad debido al agua.

En el caso contrario, también hay ciertas desventajas, si el terreno tiene una alta capacidad resistente se debe emplear una fuerza de gatos bastante elevada, que puede conllevar problemas de rotura por compresión en las dovelas, en la acción de avance de la tuneladora.

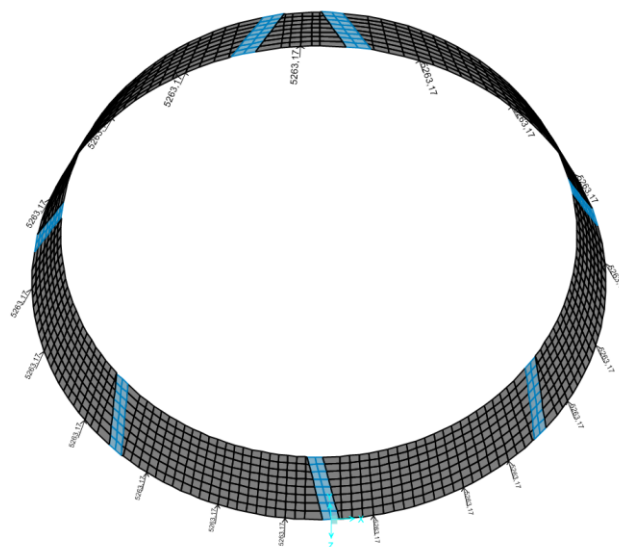
En esta tesina se ha considerado 3 casos de cargas de gatos, con magnitudes crecientes y repartidas en 19 fuerzas puntuales alrededor del anillo.

El primer caso, es denominado carga mínima, que es la fuerza básica que se debe emplear en cualquier excavación, en otras palabras, es la fuerza necesaria para mover la tuneladora sin tener en cuenta la resistencia del terreno; el segundo, es la carga nominal, que es la magnitud más general que se suele emplear con suelos con una resistencia intermedia; y por último, la carga de desbloqueo, que se suele aplicar cuando el terreno opone una gran resistencia para ser excavada.

A continuación, se puede apreciar en la tabla los valores de las cargas de los gatos y una ilustración gráfica de como se ha repartido las fuerzas generadas por la acción de avance.

<i>Fuerza total de avance</i>	<i>Fuerza por gato</i>
9.000 KN	473,68 KN
60.000 KN	3.157,89 KN
90.000 KN	4.736,84 KN

**Tabla 2.** Repartición de la fuerza de gatos



**Figura 23.** Distribución de la fuerza de los gatos de la tuneladora

### 3.5 Condiciones de apoyo

Esta fase es relativamente importante para la obtención de unos resultados coherentes. Dado que las condiciones de apoyo de cualquier estructura hacen que según las restricciones que se impongan, el comportamiento estructural sea de una manera o de otra. Por lo tanto, la definición de las condiciones de contorno que rodean el anillo del túnel, serán modelizadas lo máximo posible a la realidad.

En esta tesina, las condiciones de contorno que se cuestionan son las que genera el terreno, que es el encargado de resistir los esfuerzos que genera el túnel, y también al mismo tiempo se ocupa de su estabilidad, que es una parte muy importante en este tipo de infraestructuras civiles.

Para la simulación del terreno, se ha decidido apoyar cada nodo, que forma parte de la malla de elementos finitos, sobre un muelle que tiene las características de un suelo normal y que su función estructural sea solo a compresión, es decir, que cuando la estructura tienda a contraerse estos elementos, también denominados *links*, no opongan ninguna resistencia, pero cuando el anillo tienda a contraerse impida o ponga resistencia a este desplazamiento.

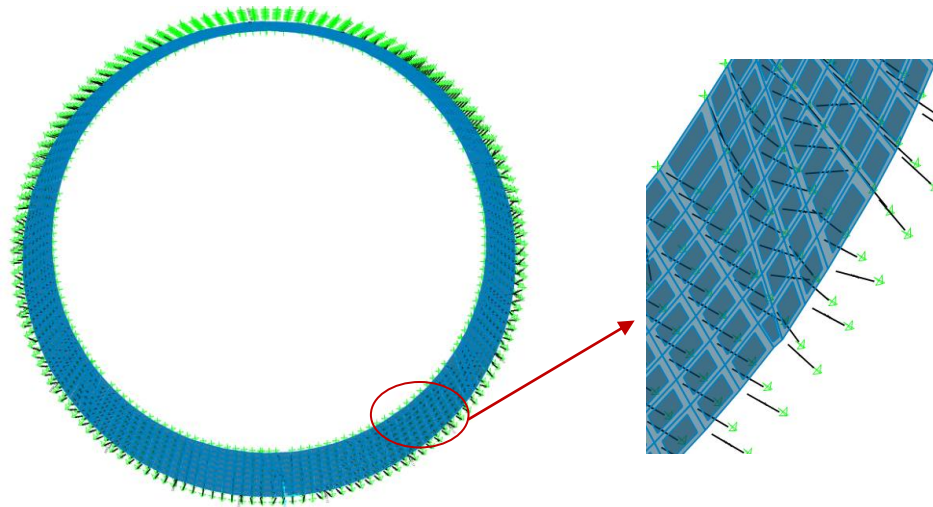
En resumen, los muelles que se emplean en el programa Sap2000 solo trabajan a compresión, así se puede garantizar que las condiciones de contorno son similares a la que se puede encontrar en la vida real, que en este caso particular es el terreno. Dichos elementos, están unidos por un extremo por los nodos de la malla y por el otro está sujeto a un apoyo fijo que no permite el desplazamiento en ninguna dirección.

Las características que se han empleado, en dicho dimensionamiento de muelles, son las siguientes:

<i>Tipología de muelle</i>	<i>Gap</i>
<i>Tipo de análisis</i>	No lineal
<i>Dirección de trabajo</i>	Unidireccional
<i>Rigidez</i>	50.000,00 KN/m
<i>Longitud</i>	0,20 m

**Tabla 3.** Propiedades del muelle que simula el terreno

En la siguiente figura, se muestra una representación gráfica de cómo ha sido modelado el terreno y como está unido a la estructura.



**Figura 24.** Condiciones de contorno del terreno

En referencia a la interacción que se produce entre dovelas para formar el anillo, se le denomina junta longitudinal. Para modelizar esta condición de borde, se han modelizado y calculado previamente casos simples, es decir, se han estudiado las dovelas individualmente usando dos tipos de apoyos en sus extremos; para poder comparar los efectos que provoca la tipología de apoyo que se considere en el análisis. Todas estas comparativas se pueden apreciar con mejor detalle en el apartado correspondiente al análisis de resultados.

Los apoyos que se han tenido en cuenta en la modelización de las dovelas individuales, son considerando apoyos articulados y otro caso con apoyos empotrados. La gran diferencia es la restricción del giro que conlleva a la aparición de momentos flectores en los bordes de las dovelas.

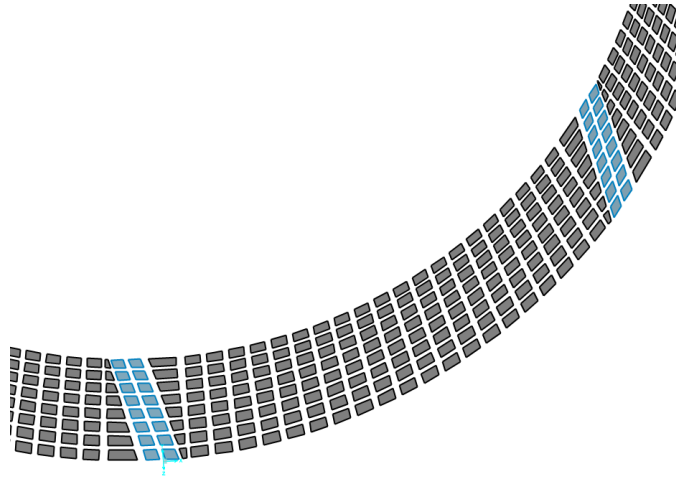
Una vez finalizado el estudio individual, se procede a analizar el problema complejo que es la interacción de los bordes de las dovelas entre ellas para conseguir la formación del anillo entero.

El problema que se presenta a la hora de modelizarlo en el programa, es que se está trabajando con elementos *shells* y para conseguir que las tensiones y esfuerzos, que se generan sobre la estructura, se produzcan de manera uniforme, es necesario que los bordes de cada dovella estén mejor discretizados para simular una junta entre dovelas.

Para los casos empotrados no es necesario realizar ninguna actividad extra en el programa, en cambio, cuando se realice un anillo donde las dovelas estén articuladas es necesario

reblandecer el material, en la zona de los bordes de cada dovela, para simular el efecto de articulación y no restringir un posible giro de la estructura.

A continuación, se muestra como se ha discretizado los bordes de la dovela en comparación con el resto de la superficie del elemento.



**Figura 25.** Discretización de las juntas longitudinales

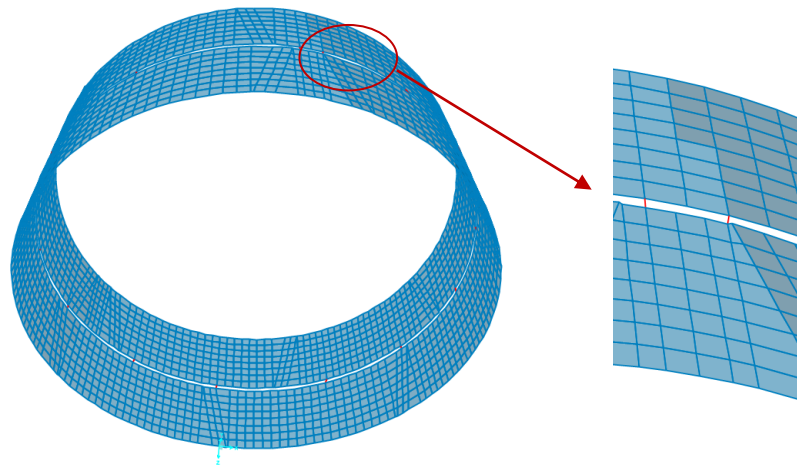
Para la representación de interacción entre anillos enteros, es necesario modelizar un elemento estructural que simule las juntas circunferenciales que existen en la realidad.

Para esta fase se diseña una barra longitudinal, con una rigidez muy elevada, que trata de conectar puntos que estén situados más o menos a la misma altura, obviamente dos puntos que no pertenezcan al mismo anillo. De esta forma, se intenta transmitir los esfuerzos a lo largo del túnel y poder observar el efecto estructural que se produce, y analizar el problema principal que se plantea en esta tesina, que es el alabeo.

Cabe destacar, que el modelo que se realiza, en el programa de elementos finitos, debe ser lo más similar posible a la realidad, por esta razón las barras longitudinales, que simulan una junta circunferencial, tienen una longitud de aproximadamente 10 cm. Este elemento trabaja solo a compresión, para transmitir correctamente los esfuerzos de una junta a otra, tal como pasaría en la vida real con una junta circunferencial.

En la *figura 26* se muestra dicho elemento estructural y su representación gráfica en 3D.





**Figura 26.** Modelización de las juntas circunferenciales

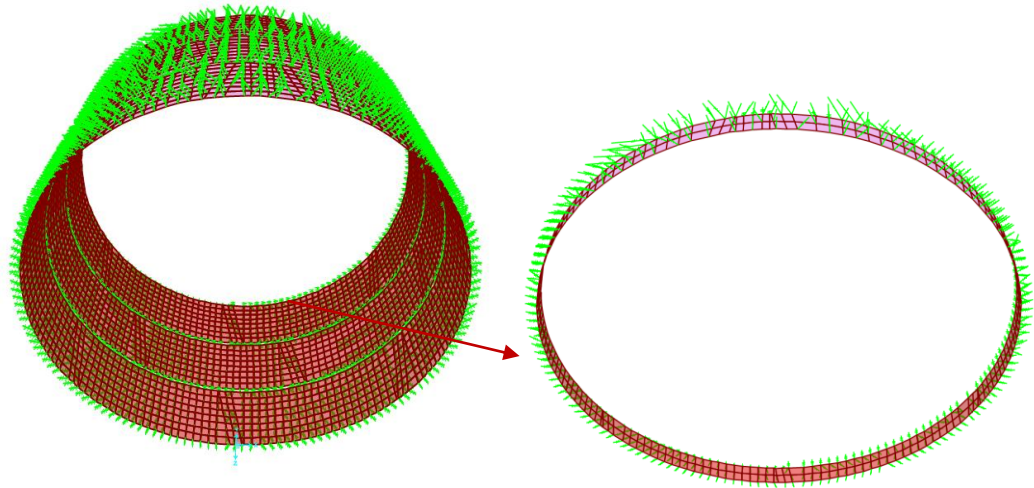
Por último, queda destacar las condiciones de contorno que se supone que debe haber en el primer anillo, cuando la tuneladora intenta avanzar hacia adelante; esta acción generada por la fuerza de los gatos, produce unos esfuerzos que se transmiten hasta el primer anillo y este debe ser capaz de resistir, sin ninguna deformación sobre el eje perpendicular del plano del anillo.

Esta condición de contorno, solo es efectiva durante la construcción del primer anillo porque al inicio de la obra, la tuneladora necesita tener un soporte para poder impulsarse (acción y reacción) y avanzar; mientras que cuando se están construyendo los siguientes anillos, la maquinaria puede usar como elemento de soporte el propio anillo anterior, previamente construido.

Esta última modelización corresponde a la rigidez del terreno, que no permite que las dovelas que están apoyadas sobre su superficie vertical se muevan hacia atrás, cuando la tuneladora está en fase de progreso.

El efecto de avance de la tuneladora, se modeliza mediante unas fuerzas puntuales alrededor del anillo, que correspondería a los gatos que ayudan al túnel a avanzar en la dirección deseada, esto se explicará con más detalle en la sección correspondiente, que se puede encontrar en el capítulo 4.

Como en los anteriores casos, se muestra una imagen de la modelización de esta última condición de contorno, donde se puede apreciar que los elementos que forman el primer anillo tienen impedido los desplazamientos en la dirección  $z$ .



**Figura 27.** Condición de contorno en la fase de avance

Para finalizar este apartado, se mostrará una tabla resumen de todas condiciones de contorno con sus respectivas propiedades mecánicas.

<i>Tipología de muelle</i>	<i>Gap</i>
<i>Tipo de análisis</i>	No lineal
<i>Dirección de trabajo</i>	Unidireccional
<i>Rigidez</i>	5.000.000,00 KN/m
<i>Longitud</i>	0,20 m

**Tabla 4.** Propiedades del muelle que simula el terreno de apoyo del primer anillo

<i>Tipología de muelle</i>	<i>Gap</i>
<i>Tipo de análisis</i>	No lineal
<i>Dirección de trabajo</i>	Unidireccional
<i>Rigidez</i>	1.000.000,00 KN/m
<i>Longitud</i>	0,10 m

**Tabla 5.** Propiedades del muelle que simula la junta circunferencial

### 3.6 Combinaciones

Los resultados que se pueden apreciar en el apartado de análisis de resultados, se basan según como se ha introducido y combinado las cargas principales, que deben resistir este tipo de estructuras.

Para esta tesina como se ha comentado anteriormente, se han modelizado tres tipologías de cargas, que son generalmente las más comunes, cabe remarcar que en la vida real pueden aparecer otras cargas que deberían tenerse en cuenta cuando se diseña un túnel, pero para la investigación que se está realizando, es suficiente con las principales.

Por lo tanto, los resultados tendrán en cuenta el peso propio de los elementos estructurales, el esfuerzo que genera el terreno sobre la estructura y la presión hidrostática, cuando el nivel freático está por encima de la base del anillo.

Para simular todas estas acciones, se realizará una combinación en estado límite de servicio, dado que el problema que se está intentando resolver, es un tema de deformaciones.

Esta combinación solo se realiza cuando la estructura está formada por todas las dovelas y el análisis estructural de la combinación se debe calcular como un caso no lineal.

En el apartado, donde se introduce el efecto de los gatos hidráulicos, también se realizará una combinación idéntica a la anterior, pero donde se añadirá las cargas de los gatos, que intentarán contrarrestar el efecto del alabeo.

A continuación, se muestra una tabla resumen de las combinaciones que se emplearán:

<i>Combinación 1</i>	<i>Coefficiente de ponderación</i>
<i>Peso propio</i>	1,00
<i>Presión de la tierra</i>	1,00
<i>Presión hidrostática</i>	1,00
<i>Caso de carga no lineal estático</i>	

**Tabla 6.** Combinación ELS 1

<i>Combinación 2</i>	<i>Coficiente de ponderación</i>
<i>Peso propio</i>	1,00
<i>Presión de la tierra</i>	1,00
<i>Presión hidrostática</i>	1,00
<i>Presión de los gatos hidráulicos</i>	1,00
<i>Caso de carga no lineal estático</i>	

**Tabla 7.** Combinación ELS 2

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 Introducción

Cuando se intenta investigar las causas de algún problema en el ámbito de la ingeniería civil, mediante programas sofisticados, siempre se debe iniciar con modelos simplificados y a medida que se aprecia que estos funcionan correctamente se puede avanzar con modelos más complejos.

De esta manera se puede ahorrar tiempo en la investigación, cuando se trata de encontrar problemas puntuales, debido a que resulta más fácil y cómodo averiguar el punto exacto donde se está cometiendo algún error, ya sea computacional o de modelaje, cuando se está trabajando con un modelo simple en lugar de una estructura compleja.

La idea básica de este apartado es analizar todos los casos, mencionados en el apartado de metodología, comenzando desde el más simple hasta el más complejo. Por consiguiente, se irá presentado los resultados de manera creciente y ordenada, con el fin de poder entender el comportamiento estructural del túnel mediante elementos finitos.

Por esta razón, en la presente tesina se modelará y analizará las dovelas de manera individual, y una vez obtenidas las pertinentes conclusiones de cada dovela, se procederá a la formación de un anillo entero, formado por estos elementos individuales que anteriormente han sido verificados que funcionan correctamente.

De la misma forma, cuando se verifique el correcto funcionamiento de un anillo, se puede proceder a la modelización de dos y tres anillos, y cuando este último funcione correctamente, se puede aplicar el caso que contiene la fuerza de los gatos hidráulicos.

En todos los casos que se estudian, se llevará a cabo dos tipos de análisis, que se diferencian básicamente por la condición de contorno, que se ha impuesto en los bordes del límite de cada dovela.

Dichas condiciones se pueden dividir en empotradas y articuladas, la diferencia que se puede apreciar es la restricción del giro que supone el caso de empotramiento, lo cual también genera la aparición de momentos flectores en los bordes de la dovela.

Todas las peculiaridades que puedan existir en los diferentes casos analizados, serán expuestas en sus debidos subapartados, y donde el lector podrá observar los resultados obtenidos de los elementos estructurales en cuestión.

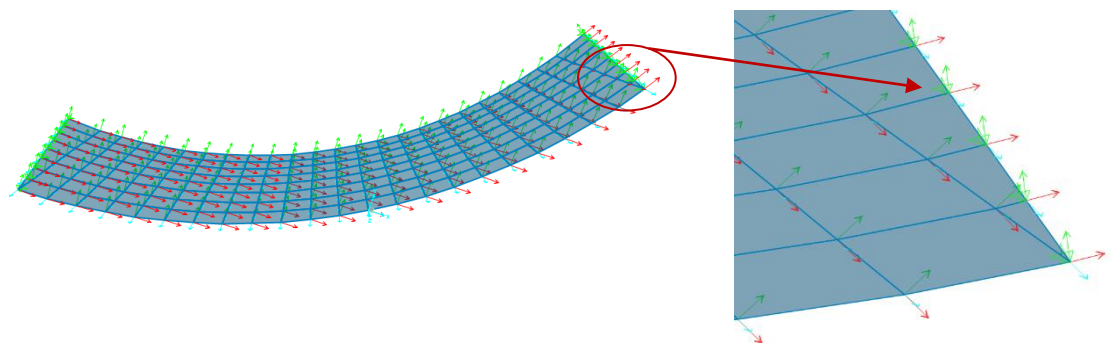
Antes de empezar a analizar resultados de los casos, es conveniente remarcar un aspecto de modelaje, que es considerado de vital importancia en esta investigación. Este aspecto en cuestión, tiene una gran importancia en los casos individuales, para todos los casos que hayan sido modelados con apoyos articulados. Debido a que una mala asignación en los apoyos, puede producir errores considerables con respecto a la realidad física.

El aspecto en cuestión es la orientación de los ejes locales, de los nodos que forman la malla de la estructura. En realidad, solo afectaría a todos los puntos que se encuentren sobre los bordes de cada elemento prefabricado.

Por norma general, en el programa Sap2000 los ejes locales se orientan siguiendo la orientación de los ejes globales,

Por consiguiente, para poder simular un apoyo articulado es necesario tener orientado los ejes locales de los puntos, pertenecientes al límite de cada dovela, en la misma dirección del borde de cada elemento individual.

Por esa razón, si se pretende restringir desplazamientos y giros sobre el borde de la dovela, es necesario orientar los ejes locales lo máximo posible al borde de la dovela, de esta forma se consigue simular las restricciones que se tienen en un modelo real. En la siguiente ilustración se puede apreciar cómo se ha orientado los ejes locales.



**Figura 28.** Orientación de los ejes locales en los bordes

El mal diseño de esta condición de contorno, puede conllevar a la obtención de resultados erróneos debido a la mala interpretación del programa Sap2000, dado que los resultados que genera el programa son correctos para la configuración que se haya impuesto.

Por esta razón, es muy importante hacer un número aproximado de la solución que debería dar, para comprobar si se está introduciendo correctamente los datos del problema a resolver.

Las dovelas que se estudiarán, son las que formarán un anillo entero, es decir, la dovela trapezoidal, la paralelogramica y la clave, esta última es fundamental para conseguir cerrar el anillo entero.

Las dovelas serán analizadas cuando se aplica de forma radial una fuerza de  $10 \text{ kN/m}^2$  con un factor de mayoración de 40 para obtener la máxima condición desfavorable.

A continuación, se podrá observar el análisis de cada dovela con dos condiciones diferentes, y se podrá observar las deformaciones y los esfuerzos resultantes sobre los elementos láminas que forman la dovela.

Cabe destacar que se ha discretizado lo máximo posible, para que la solución sea la más próxima a la solución analítica. Dado que cuanto mayor sea el número de elementos finitos, que conformen una estructura, mejor aproximación se tendrá, pero esto conlleva a un alto coste computacional, por eso, se ha discretizado de manera intermedia que ya es suficiente para el cálculo que se está desarrollando en esta tesina.

En los siguientes subapartados, se puede observar los datos más relevantes con su posterior análisis, de todos los casos que se han mencionado.

Primero de todo, se observarán los casos individuales y posteriormente, los casos complejos, y, por último, el caso con mayor relevancia, que es el estudio de cuantificar la fuerza necesaria que se necesita para anular el efecto del alabeo, para un túnel formado por tres anillos.

Para orientar al lector, en que punto se encuentra dentro de esta investigación, se muestra un croquis general de la progresión actual:

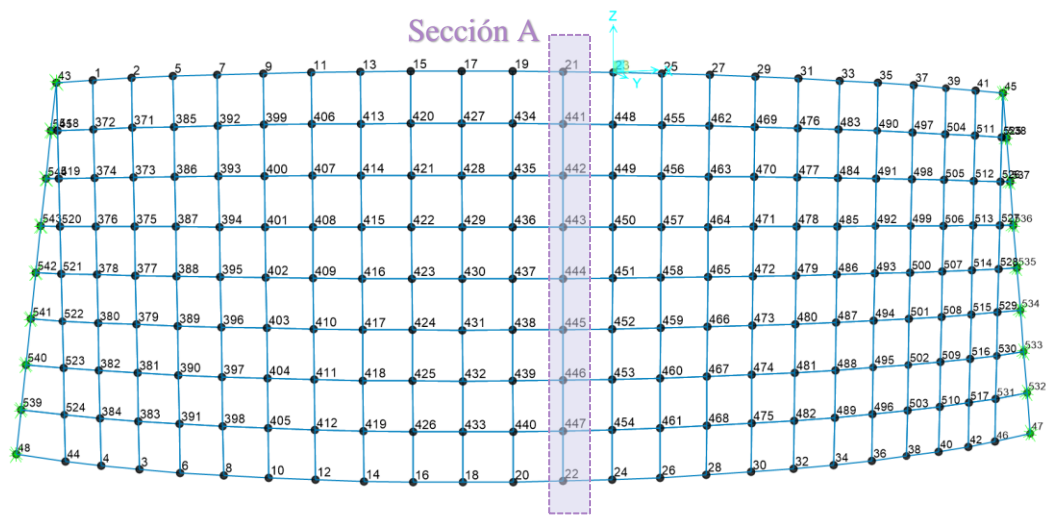


## 4.2 Dovela trapezoidal

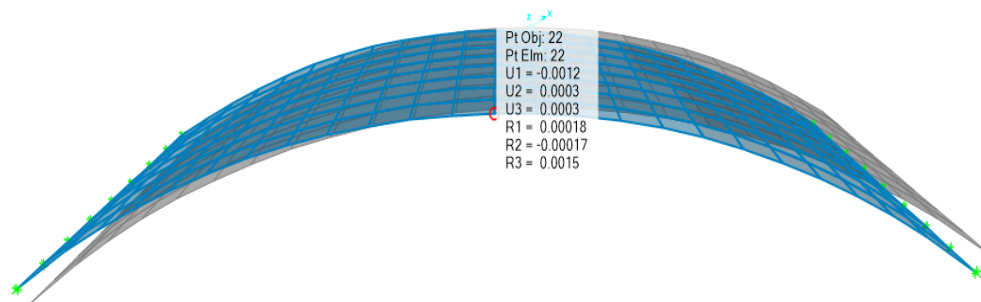
Aplicando todas las condiciones que se han mencionado en los anteriores apartados, el programa de elementos finitos genera los siguientes resultados, que se recogen en forma de ilustraciones y tablas.

Cabe destacar que todas las dovelas individuales están sometidas a cargas radiales, simulando que su colocación es en la parte superior del anillo.

### 4.2.1 Articulada

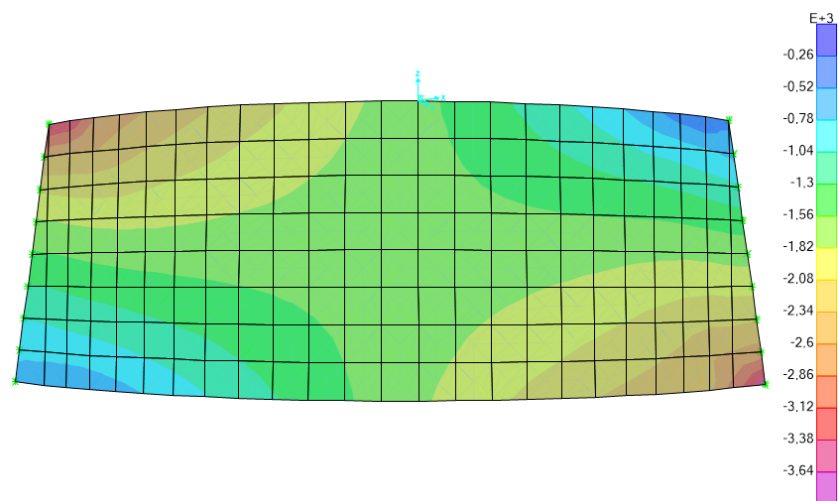


**Figura 29.** Etiquetado de los puntos que forman la dovela trapezoidal y sección longitudinal A

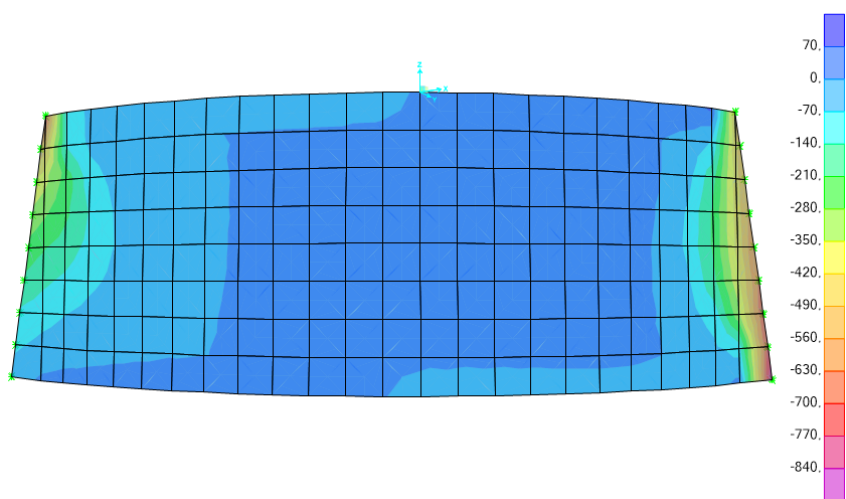


**Figura 30.** Deformada dovela trapezoidal articulada *unidades en metro (x20)*

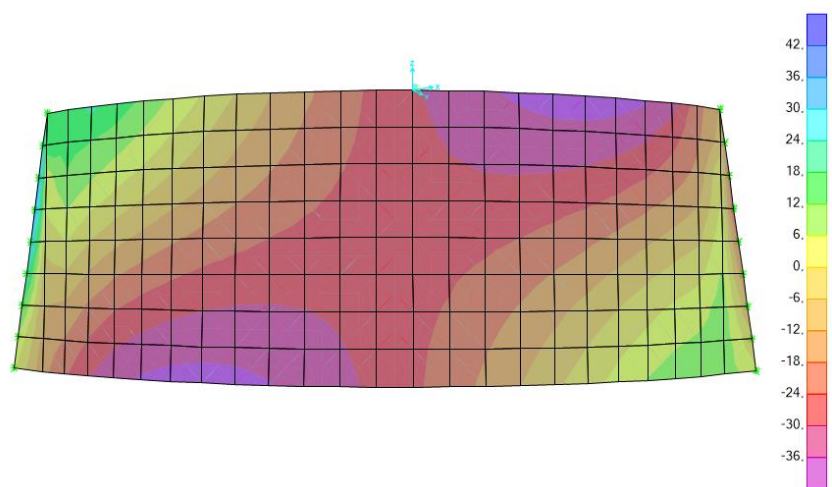




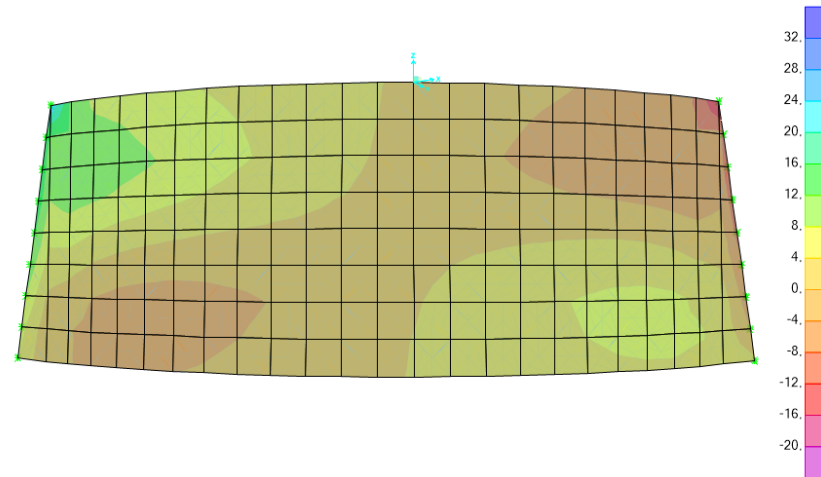
**Figura 31.** Esfuerzos F11 unidades en kN/m



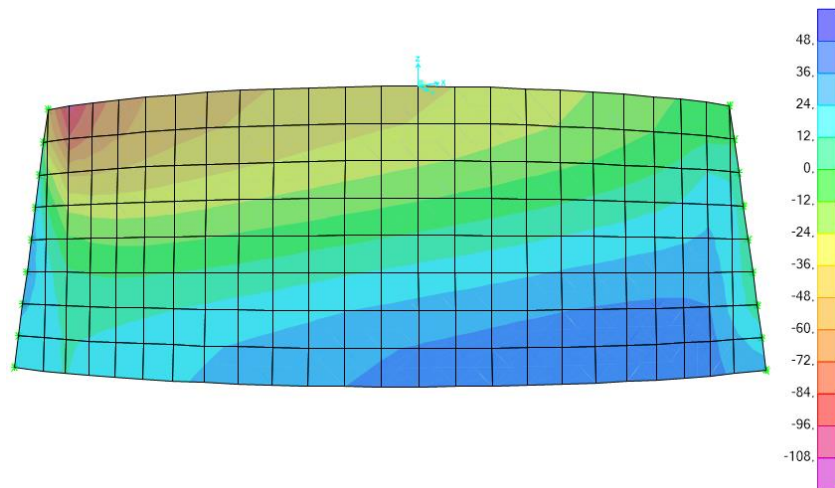
**Figura 32.** Esfuerzos F22 unidades en kN/m



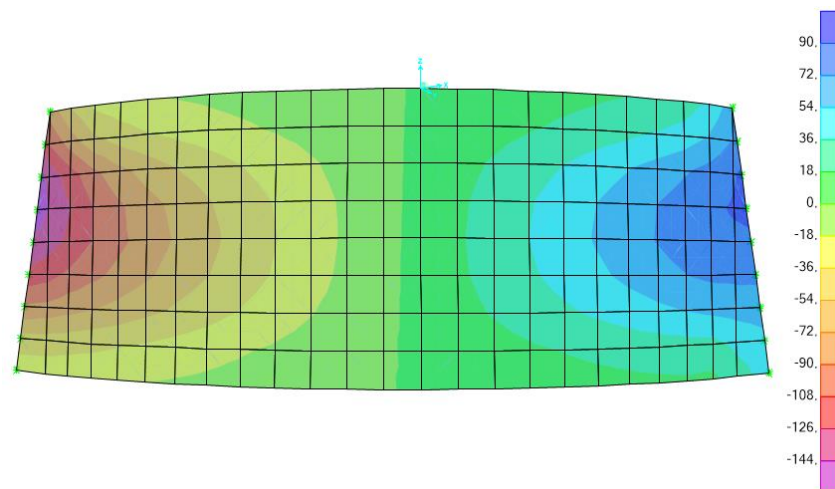
**Figura 33.** Esfuerzos M11 unidades en kN-m/m



**Figura 34.** Esfuerzos M22 *unidades en kN-m/m*

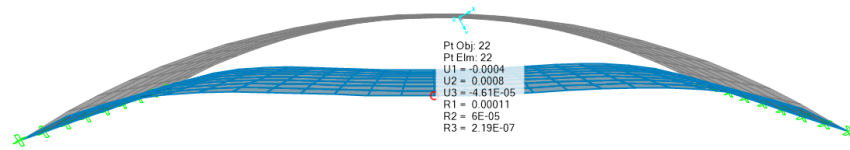


**Figura 35.** Esfuerzos V13 *unidades en kN/m*

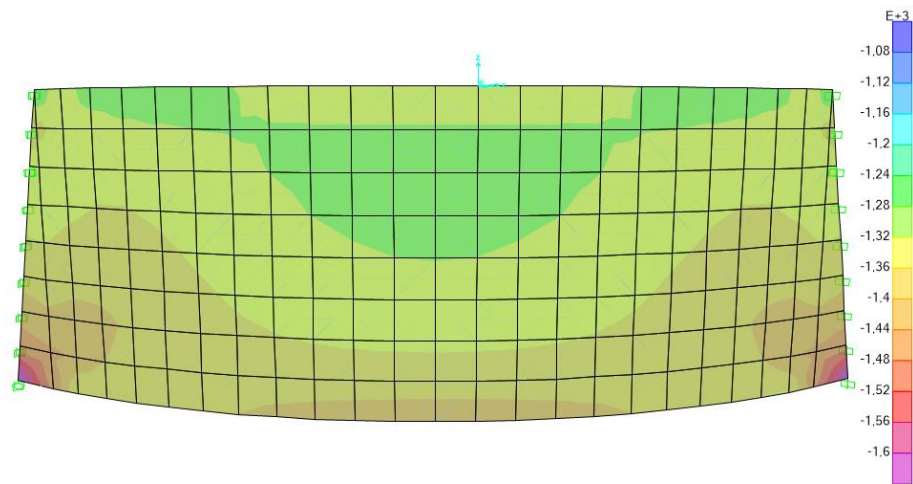


**Figura 36.** Esfuerzos V23 *unidades en kN/m*

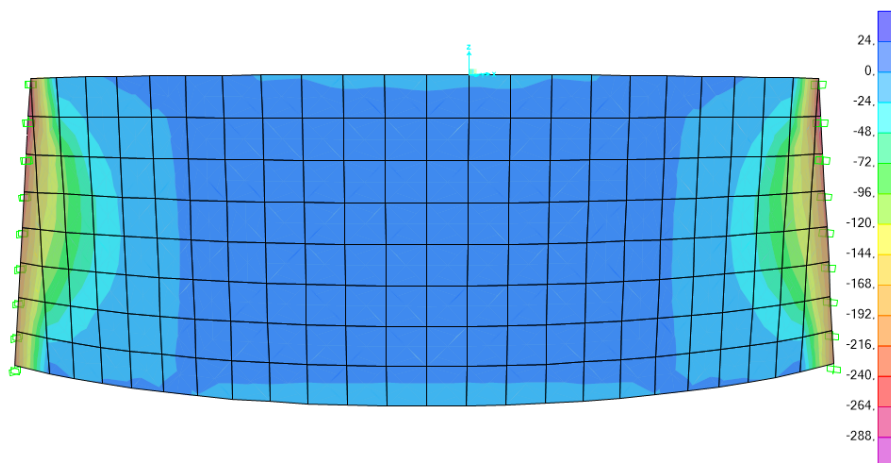
## 4.2.2 Empotrada



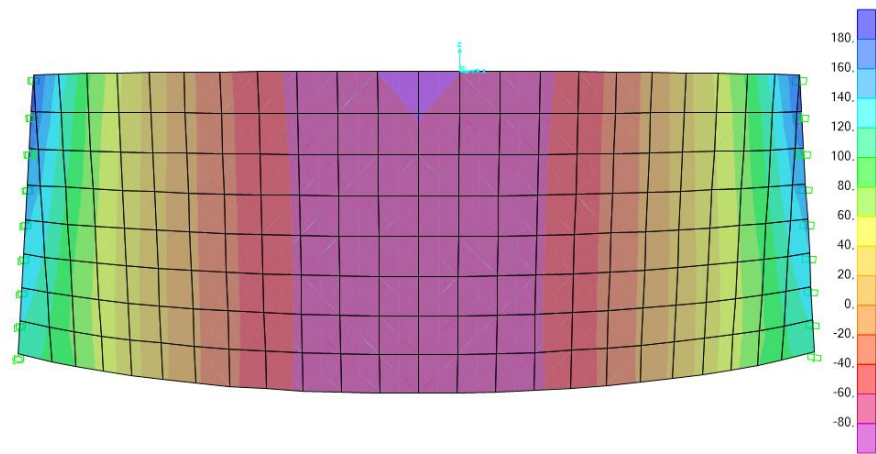
**Figura 37.** Deformada dovela trapezoidal empotrada *unidades en metro (x500)*



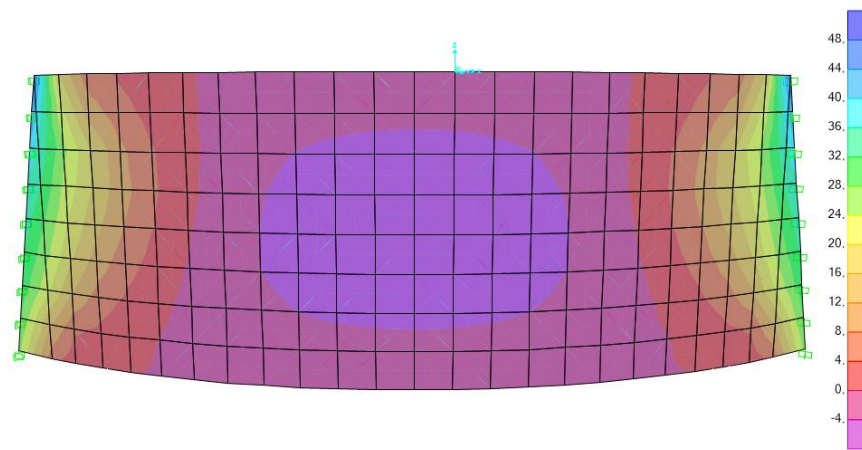
**Figura 38.** Esfuerzos F11 *unidades en kN/m*



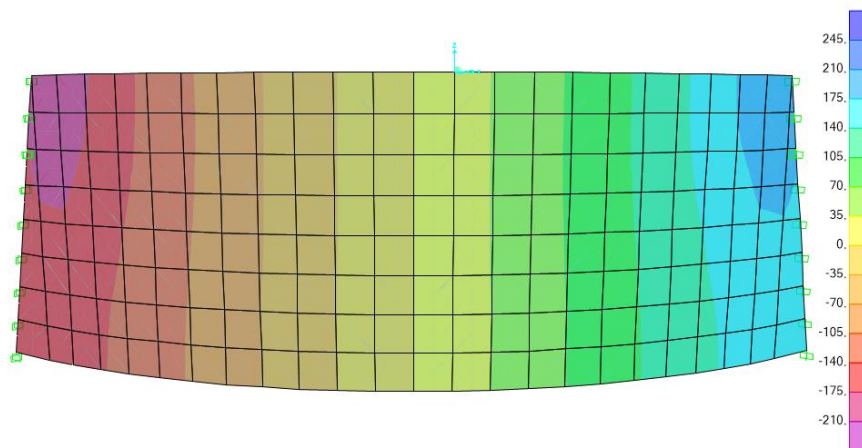
**Figura 39.** Esfuerzos F22 *unidades en kN/m*



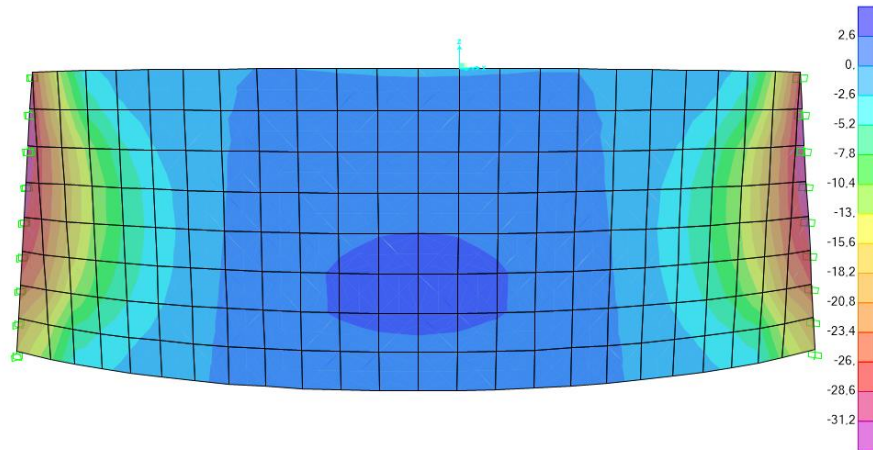
**Figura 40.** Esfuerzos M11 unidades en  $kN\cdot m/m$



**Figura 41.** Esfuerzos en M22 unidades en  $kN\cdot m/m$



**Figura 42.** Esfuerzos V13 unidades en  $kN/m$



**Figura 43.** Esfuerzos V23 unidades en  $kN/m$

### 4.2.3 Comparativa

A continuación, se mostrará una comparativa de los desplazamientos que se obtienen según la condición de contorno que se imponga en la dovela trapezoidal, para poder entender el comportamiento de los elementos individuales.

Los puntos que se observan, en las tablas inferiores, corresponden al corte longitudinal de la Sección A, que aparece en la *figura 29*.

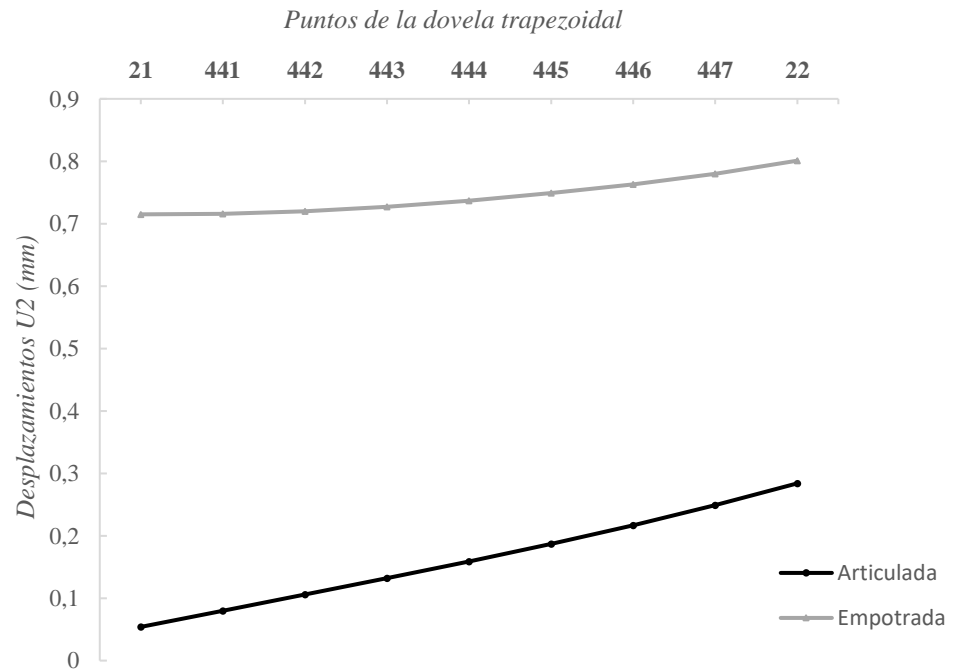
Punto	U1	U2	U3	R1	R2	R3
	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>
<b>21</b>	-1,50E-03	5,40E-05	3,22E-04	1,30E-04	-1,96E-04	1,66E-03
<b>441</b>	-1,46E-03	8,00E-05	3,16E-04	1,34E-04	-1,86E-04	1,64E-03
<b>442</b>	-1,42E-03	1,06E-04	3,11E-04	1,39E-04	-1,79E-04	1,62E-03
<b>443</b>	-1,39E-03	1,32E-04	3,06E-04	1,42E-04	-1,70E-04	1,60E-03
<b>444</b>	-1,36E-03	1,59E-04	3,00E-04	1,49E-04	-1,68E-04	1,58E-03
<b>445</b>	-1,33E-03	1,87E-04	2,95E-04	1,53E-04	-1,63E-04	1,56E-03
<b>446</b>	-1,31E-03	2,17E-04	2,90E-04	1,62E-04	-1,66E-04	1,54E-03
<b>447</b>	-1,27E-03	2,49E-04	2,85E-04	1,70E-04	-1,66E-04	1,52E-03
<b>22</b>	-1,24E-03	2,84E-04	2,80E-04	1,80E-04	-1,68E-04	1,51E-03

**Tabla 8.** Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno articulada

Punto	U1	U2	U3	R1	R2	R3
	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>
21	-3,87E-04	7,15E-04	-1,30E-05	-5,16E-06	-2,76E-06	8,65E-08
441	-3,87E-04	7,16E-04	-1,70E-05	1,40E-05	7,63E-06	9,85E-08
442	-3,90E-04	7,20E-04	-2,10E-05	2,90E-05	1,60E-05	1,12E-07
443	-3,94E-04	7,27E-04	-2,50E-05	4,20E-05	2,30E-05	1,27E-07
444	-3,99E-04	7,37E-04	-2,90E-05	5,40E-05	2,90E-05	1,43E-07
445	-4,05E-04	7,49E-04	-3,30E-05	6,50E-05	3,50E-05	1,61E-07
446	-4,13E-04	7,63E-04	-3,70E-05	7,80E-05	4,30E-05	1,79E-07
447	-4,22E-04	7,80E-04	-4,20E-05	9,40E-05	5,10E-05	1,99E-07
22	-4,33E-04	8,01E-04	-4,60E-05	1,13E-04	6,10E-05	2,19E-07

**Tabla 9.** Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno empotrada

En referencia a las *tablas 8 y 9*, se debe mencionar que los desplazamientos U1, U2 y U3 que aparecen en las tablas anteriores, corresponden al movimiento circunferencial, radial y del eje del túnel, respectivamente.



**Gráfica 1.** Articulada vs Empotrada (Dovela trapezoidal)

Mediante la información de las *tablas* 8 y 9 se puede realizar un gráfico comparativo de las deformaciones en el **eje Y**, diferenciadas únicamente por la tipología de apoyo empleado en sus extremos.

La *gráfica 1* muestra las deformadas de la dovela trapezoidal en función de la condición de contorno de cada una. Dichas deformadas, corresponden a un corte longitudinal (en dirección del eje Z) de la *Sección A*, que está comprendida entre los puntos 21 y 22, correspondientes a la *figura 29*.

Teniendo en cuenta la representación gráfica mostrada anteriormente, se deduce que la dovela trapezoidal tiende a deformarse más (en la zona central) con la condición de contorno empotrada. Esto se produce, debido a que en los bordes de la dovela articulada se permiten los movimientos radiales, y compensa de alguna manera las deformaciones que se puedan producir en la zona media de la dovela.

Las deformaciones en ambos casos siguen un patrón coherente, es decir, a medida que se va avanzando a lo largo de la sección, los movimientos van creciendo de manera uniforme. Esto es debido a la geometría que tiene la dovela trapezoidal, dado que en un extremo de la dovela es más pequeño que en el otro extremo. En referencia a la *figura 29* el borde inferior de la dovela tiene más distancia de cálculo, con lo que conlleva a que se deforme más respecto al borde superior de la estructura.

Respecto a los esfuerzos obtenidos para ambos casos, cabe destacar las siguientes diferencias estructurales que se han apreciado mediante las figuras anteriores.

En la estructura articulada se aprecia claramente que en sus bordes el momento es prácticamente cero, debido a que en ese caso no se ha restringido la rotación sobre los ejes. Además, en la *figura 34* se observa que los momentos son nulos en toda la dovela, esto confirma que las restricciones que se han impuesto en este caso funcionan correctamente.

En cambio, en el caso empotrado sí que se genera momentos en los extremos y, además, el momento máximo que se obtiene en el centro de la dovela es un 48% superior que en el caso articulado.

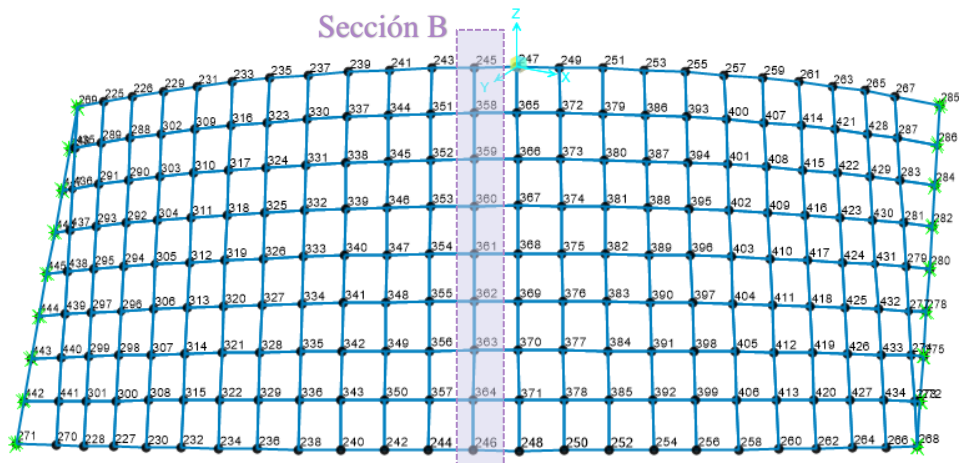
Obviamente, la aparición de momentos conlleva a que se produzcan cortantes considerables. En el caso empotrado se generan 2,69 veces más que en el caso articulado, pero se sigue manteniendo la misma forma de distribución de los esfuerzos sobre la dovela en ambos casos.



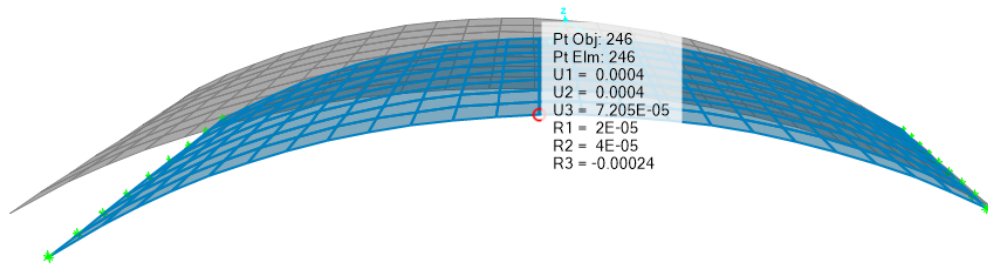
### 4.3 Dovela paralelográfica

En este apartado se realizará el mismo procedimiento que en la dovela trapezoidal, por lo tanto, a continuación, se detalla los resultados obtenidos mediante mapas temáticos y tablas.

#### 4.3.1 Articulada

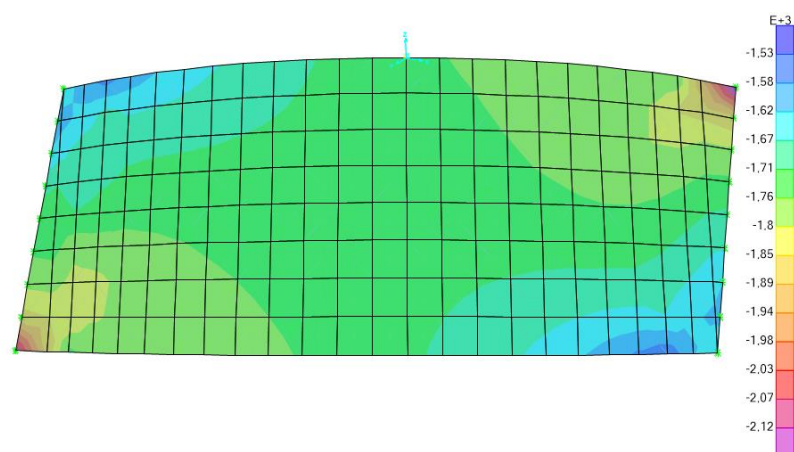


**Figura 44.** Etiquetado de los puntos que forman la dovela paralelográfica y sección longitudinal B

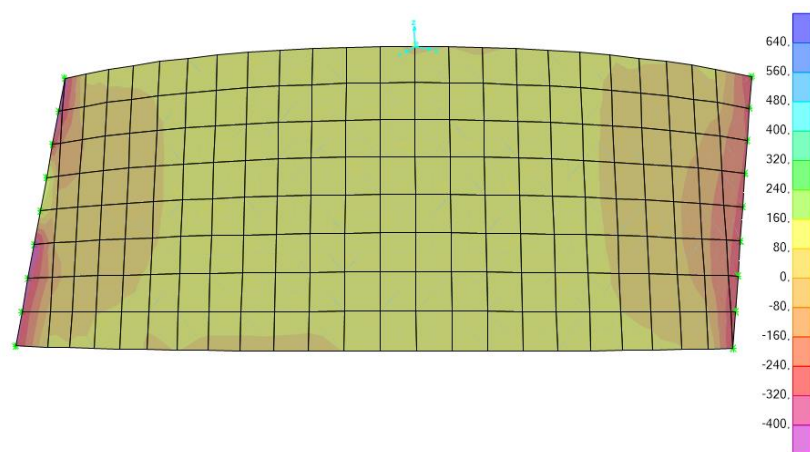


**Figura 45.** Deformada dovela paralelográfica articulada *unidades en metro (x200)*

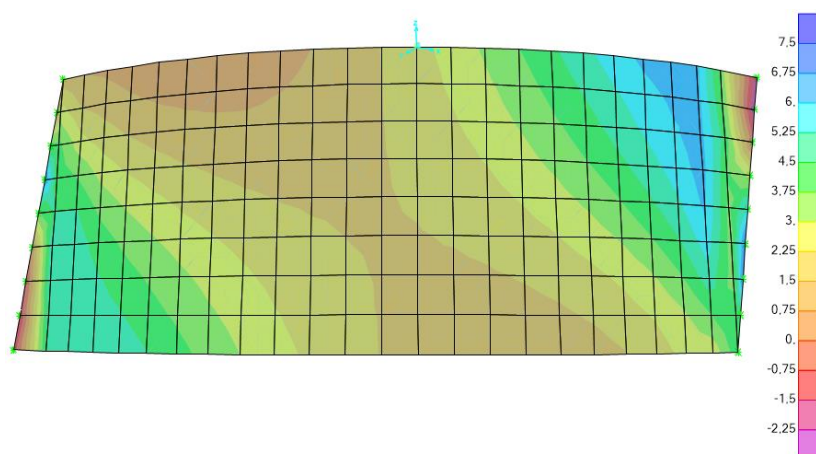




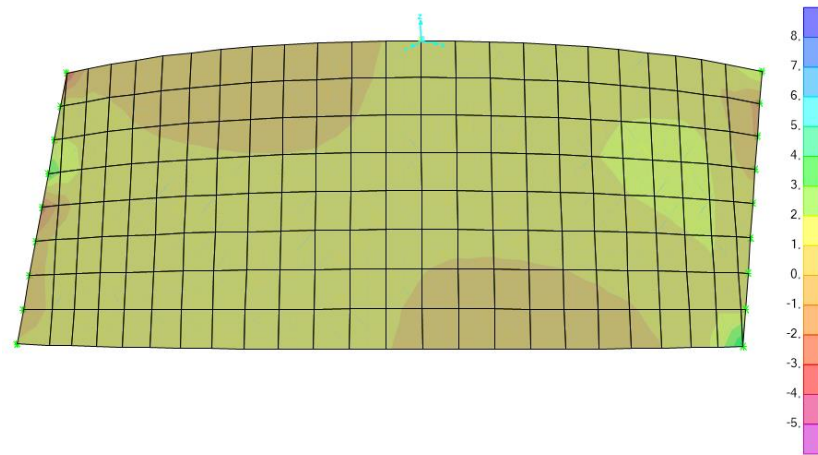
**Figura 46.** Esfuerzos F11 unidades en  $\text{kN/m}$



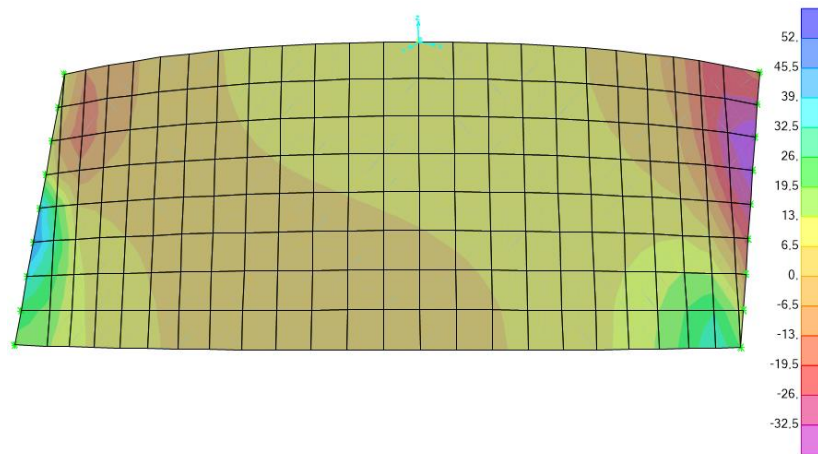
**Figura 47.** Esfuerzos F22 unidades en  $\text{kN/m}$



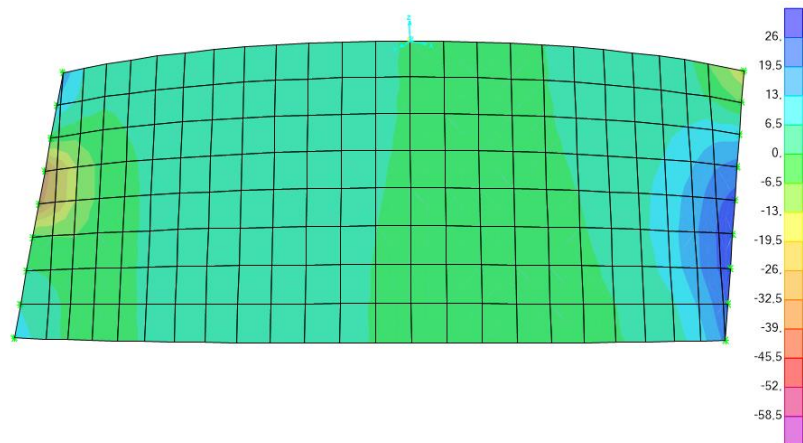
**Figura 48.** Esfuerzos M11 unidades en  $\text{kN-m/m}$



**Figura 49.** Esfuerzos M22 unidades en  $kN\cdot m/m$

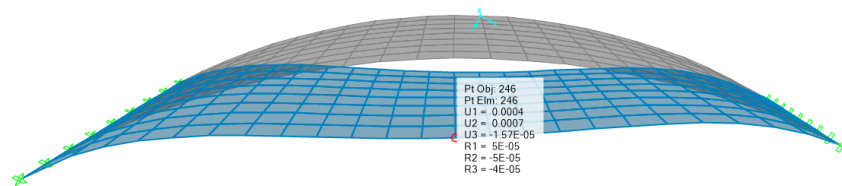


**Figura 50.** Esfuerzos V13 unidades en  $kN/m$

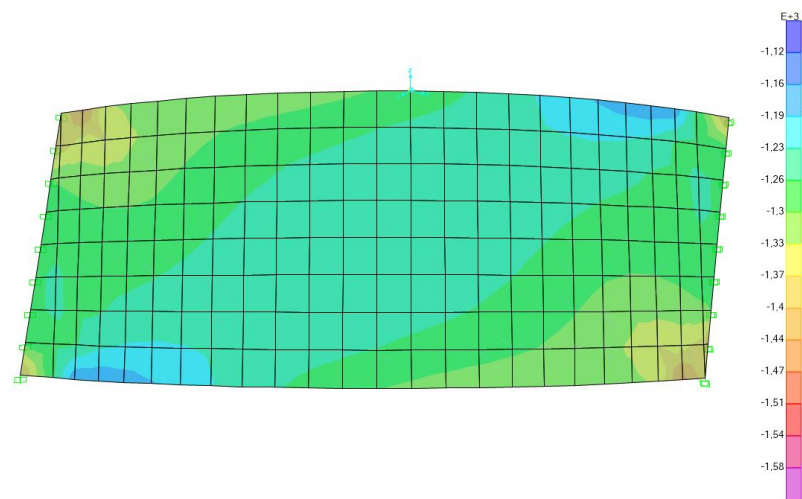


**Figura 51.** Esfuerzos V23 unidades en  $kN/m$

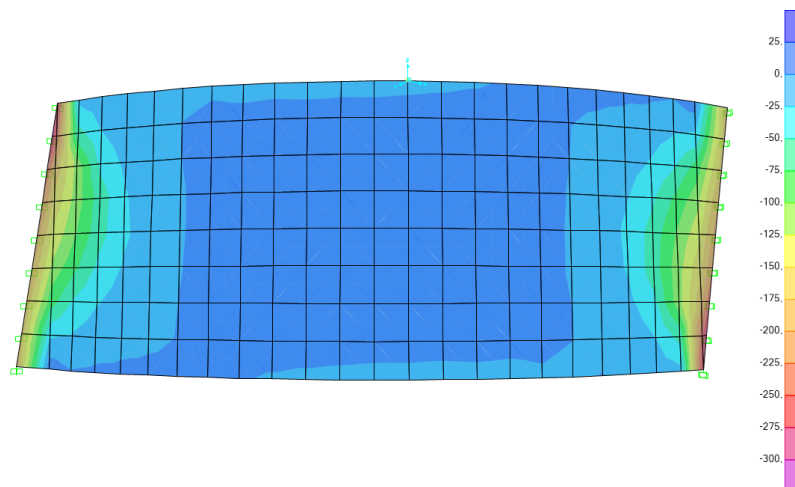
### 4.3.2 Empotrada



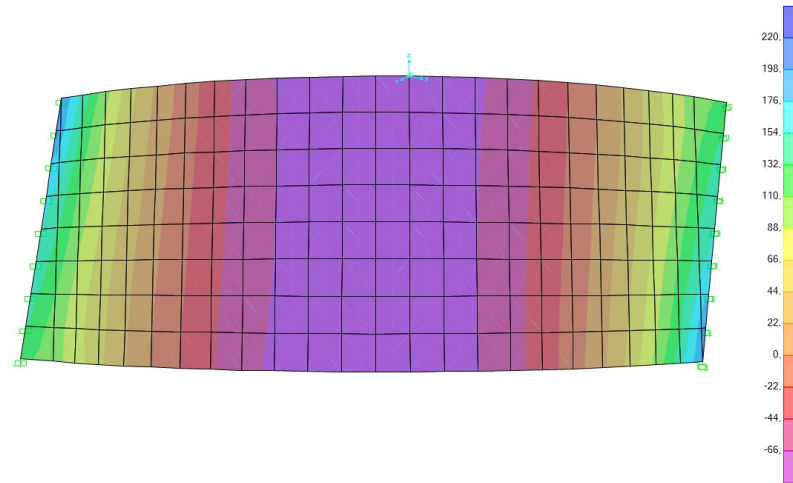
**Figura 52.** Deformada dovela paralelográmica empotrada *unidades en metro (x500)*



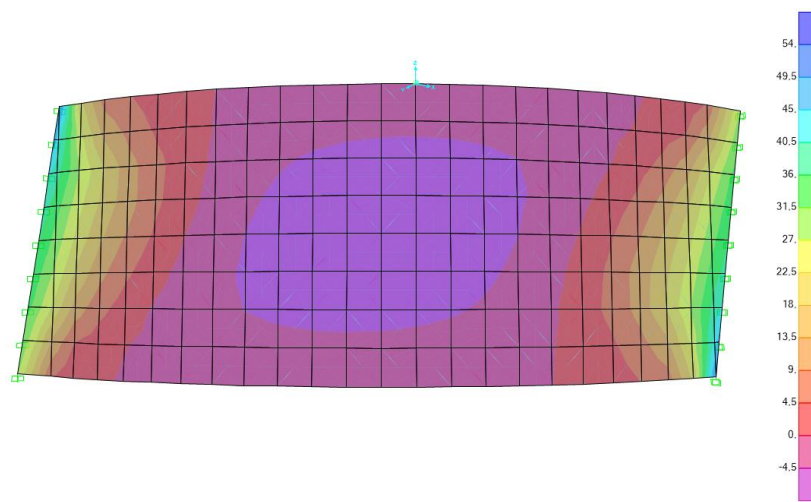
**Figura 53.** Esfuerzos F11 *unidades en kN/m*



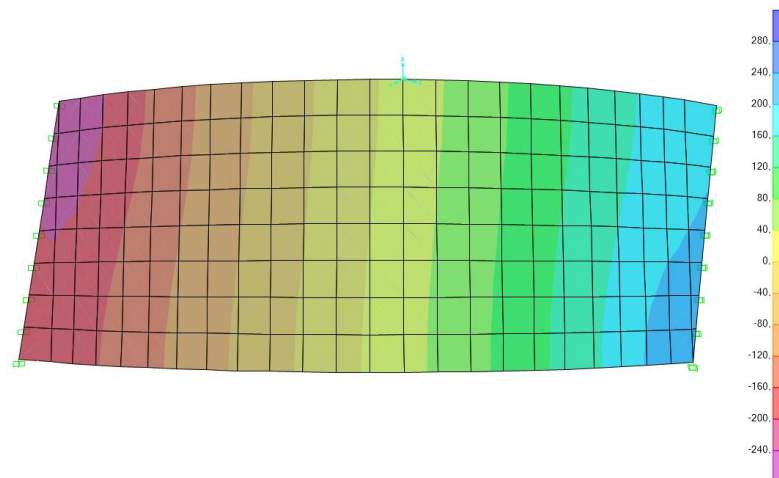
**Figura 54.** Esfuerzos F22 *unidades en kN/m*



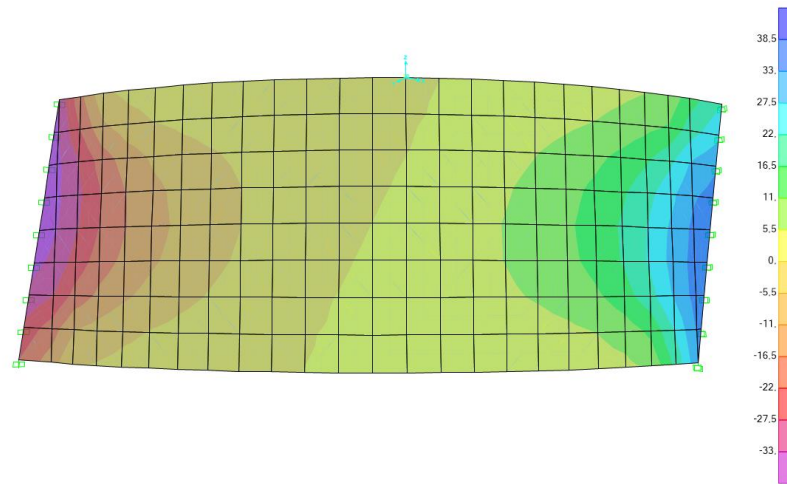
**Figura 55.** Esfuerzos M11 unidades en  $kN\cdot m/m$



**Figura 56.** Esfuerzos M22 unidades en  $kN\cdot m/m$



**Figura 57.** Esfuerzos V13 unidades  $kN/m$



**Figura 58.** Esfuerzos V23 unidades en kN/m

### 4.3.3 Comparativa

A continuación, se mostrará una comparativa de los desplazamientos que se obtienen según la condición de contorno que se imponga en la dovela paralelográfica para poder entender el comportamiento de los elementos individuales, que formarán el anillo de la infraestructura.

Punto	U1	U2	U3	R1	R2	R3
	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>
<b>245</b>	4,44E-04	4,00E-04	1,15E-04	2,40E-05	4,00E-05	-2,46E-04
<b>358</b>	4,36E-04	4,05E-04	1,10E-04	2,40E-05	4,00E-05	-2,46E-04
<b>359</b>	4,28E-04	4,10E-04	1,04E-04	2,30E-05	3,90E-05	-2,45E-04
<b>360</b>	4,21E-04	4,14E-04	9,90E-05	2,30E-05	4,00E-05	-2,45E-04
<b>361</b>	4,13E-04	4,18E-04	9,40E-05	2,20E-05	3,90E-05	-2,44E-04
<b>362</b>	4,06E-04	4,22E-04	8,80E-05	2,20E-05	4,00E-05	-2,44E-04
<b>363</b>	3,98E-04	4,26E-04	8,30E-05	2,20E-05	4,00E-05	-2,44E-04
<b>364</b>	3,90E-04	4,31E-04	7,70E-05	2,20E-05	4,10E-05	-2,43E-04
<b>246</b>	3,82E-04	4,35E-04	7,20E-05	2,20E-05	4,10E-05	-2,43E-04

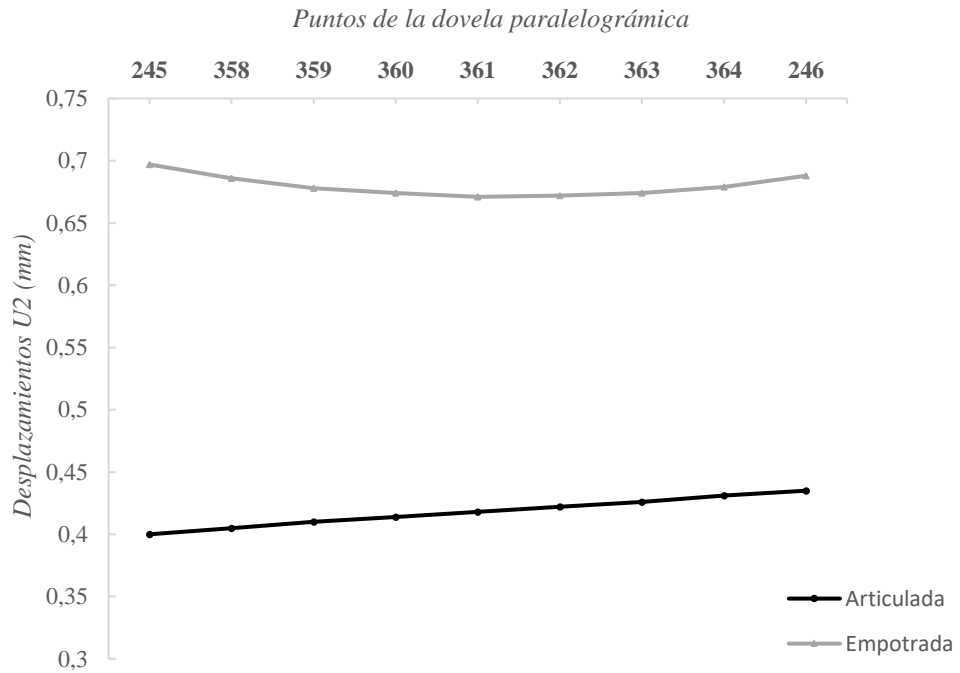
**Tabla 10.** Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno articulada

Los puntos que se observan, en las *tablas 10 y 11*, corresponden al corte longitudinal de la Sección B, que aparece en la *figura 44*.

Punto	U1	U2	U3	R1	R2	R3
	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>
245	3,99E-04	6,97E-04	1,60E-05	-6,70E-05	2,20E-05	4,00E-05
358	3,96E-04	6,86E-04	1,20E-05	-4,60E-05	1,30E-05	3,00E-05
359	3,94E-04	6,78E-04	7,86E-06	-3,10E-05	2,44E-06	2,00E-05
360	3,94E-04	6,74E-04	3,94E-06	-1,70E-05	-3,31E-06	9,89E-06
361	3,95E-04	6,71E-04	1,97E-08	-6,70E-06	-1,20E-05	-4,89E-07
362	3,97E-04	6,72E-04	-3,90E-06	5,67E-06	-1,70E-05	-1,10E-05
363	4,01E-04	6,74E-04	-7,82E-06	1,70E-05	-2,60E-05	-2,10E-05
364	4,06E-04	6,79E-04	-1,20E-05	3,40E-05	-3,40E-05	-3,10E-05
246	4,14E-04	6,88E-04	-1,60E-05	5,20E-05	-4,80E-05	-4,10E-05

**Tabla 11.** Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno empotrada

En referencia a las *tablas 10 y 11*, se debe mencionar que los desplazamientos U1, U2 y U3 que aparecen en las tablas anteriores, corresponden al movimiento circunferencial, radial y del eje del túnel, respectivamente.



**Gráfica 2.** Articulada vs Empotrada (Dovela paralelográfica)

Con la información adjuntada en las *tablas 10 y 11*, se puede interpretar de manera representativa la diferencia que existe entre las diferentes condiciones de contorno, que se impongan en la dovela trapezoidal, en referencia a las deformaciones que se producen en la dirección del **eje Y**.

El *gráfico 2* representa las deformaciones que padece la dovela según el apoyo que se utilice. Las deformadas que se muestran, Corresponden al corte longitudinal de la *Sección B* de la dovela paralelográfica en la parte central de la estructura. Este corte contiene los puntos 245 hasta 246 en la dirección paralela al eje Z.

Como se puede apreciar de la anterior ilustración, se ve claramente que la estructura que más sufre a deformación (en la zona central) es la empotrada. Además, el patrón de la deformación que se aprecia en la gráfica, es muy diferente a la que se ha obtenido en la dovela trapezoidal.

En este caso las zonas más críticas son los extremos del corte longitudinal, esto es debido a la geometría que tiene la estructura, dado que el borde superior e inferior son más largos que la zona central, que está comprendida de un extremo a otro extremo.

En referencia a los esfuerzos obtenidos sobre la superficie de la dovela se puede observar, mediante las gráficas anteriores, que son prácticamente idénticos tanto si se trata de estructuras con apoyos articulados como empotrados, excepto en los gráficos donde se representan los momentos flectores.

En estos últimos se observan distribuciones de momentos similares a los que se obtenían en el caso de la dovela trapezoidal, es decir, con condiciones de borde articulados el momento es prácticamente nulo mientras que en el caso empotrado se generan momentos flectores considerables.

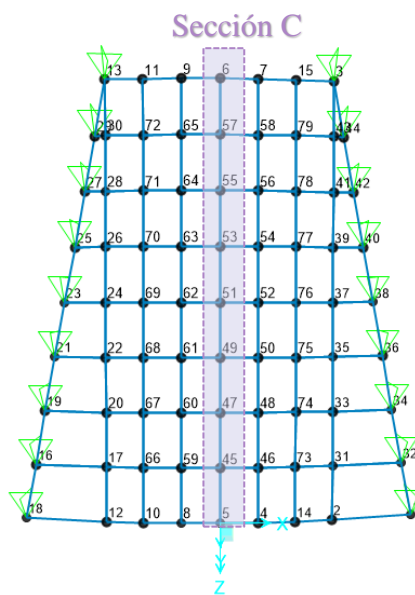
También se puede observar, tal como pasaba en el caso trapezoidal, de la *figura 49* que los momentos flectores son nulos, esto verifica que este modelaje funciona correctamente, básicamente porque una estructura circular sometida a cargas radiales con apoyos articulados, sus momentos resultantes deben ser cero.

## 4.4 Dovela clave

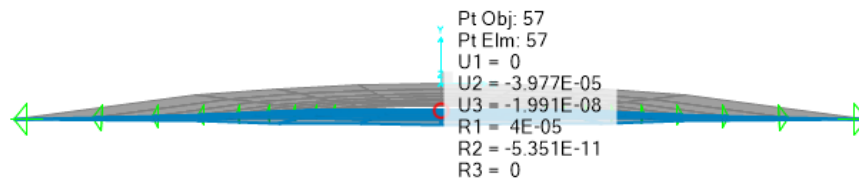
En esta sección se realizará el mismo procedimiento que en las dovelas anteriores, pero con una pequeña modificación, al ser un segmento relativamente pequeño no se puede imponer un desplazamiento radial, como consecuencia se imponen restricciones en todas las direcciones en las zonas de apoyo.

A continuación, se detalla los resultados obtenidos mediante mapas temáticos y tablas.

### 4.4.1 Articulada

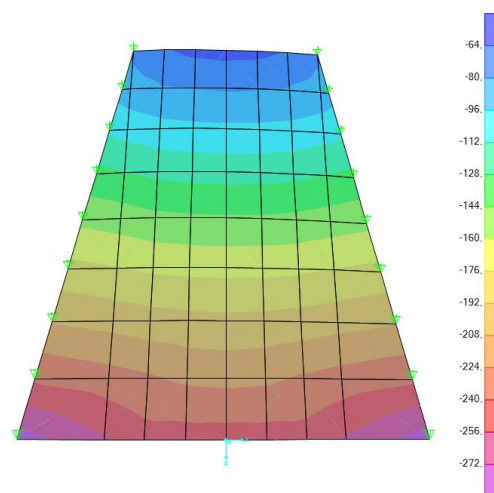


**Figura 59.** Etiquetado de los puntos que forman la dovela clave y sección longitudinal C

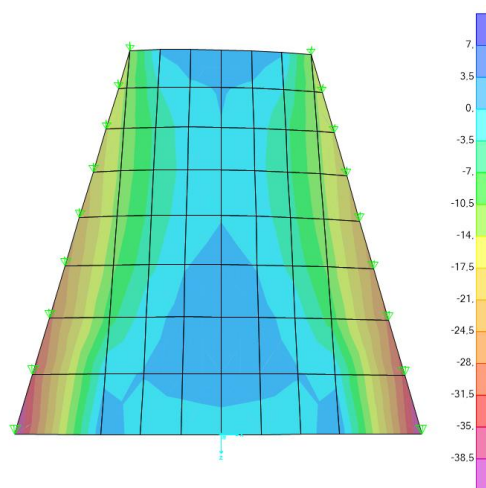


**Figura 60.** Deformada dovela clave articulada *unidades en metro (x500)*

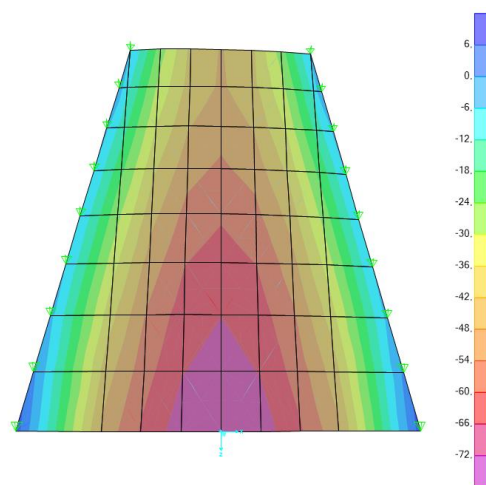




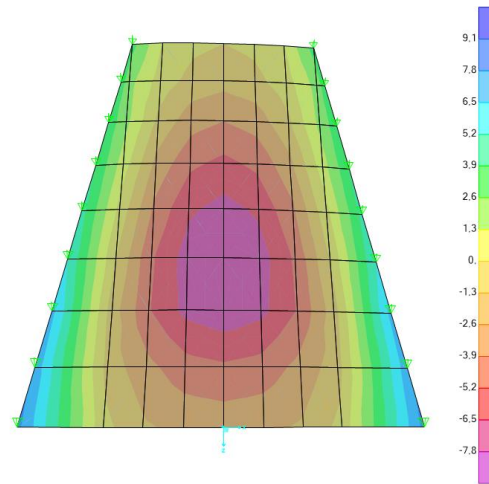
**Figura 61.** Esfuerzos F11 *unidades en kN/m*



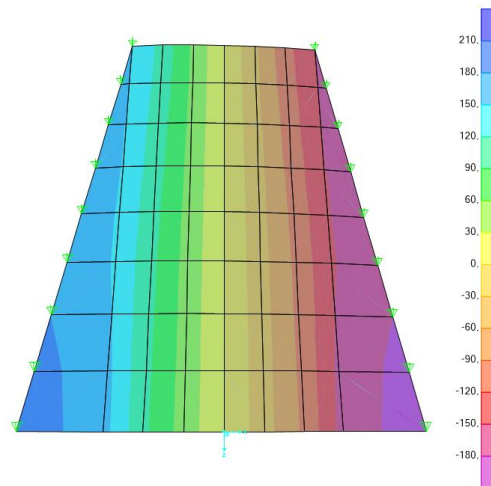
**Figura 62.** Esfuerzos F22 *unidades en kN/m*



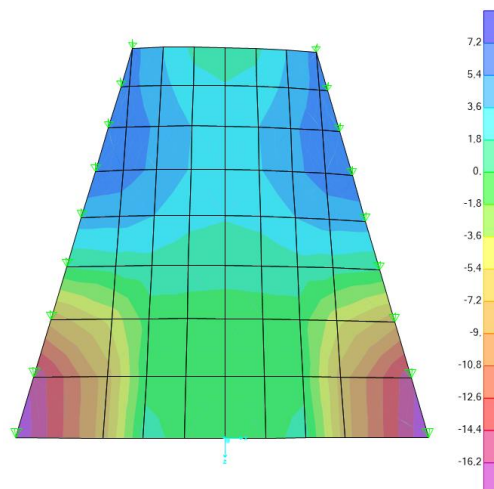
**Figura 63.** Esfuerzos M11 *unidades en kN-m/m*



**Figura 64.** Esfuerzos M22 *unidades en kN-m/m*

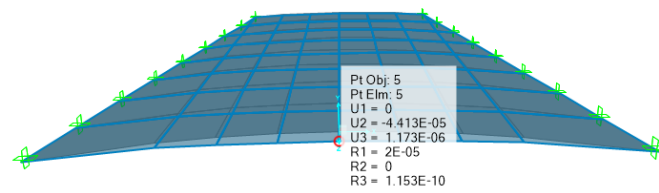


**Figura 65.** Esfuerzos V13 *unidades en kN/m*

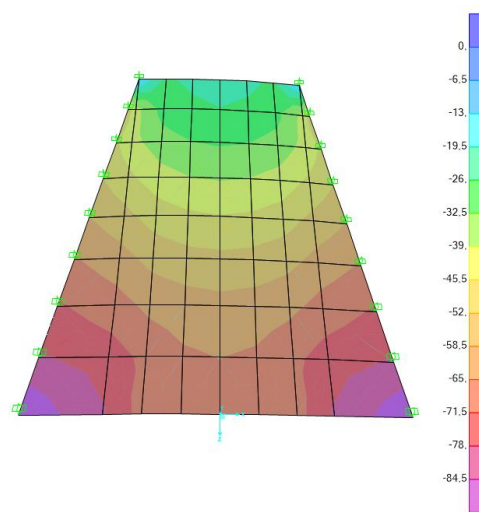


**Figura 66.** Esfuerzos V23 *unidades en kN/m*

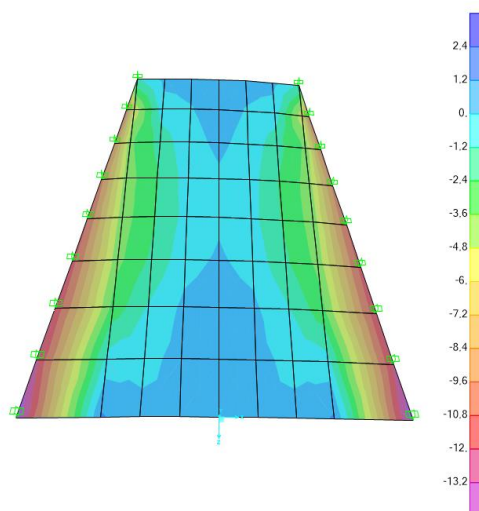
#### 4.4.2 Empotrada



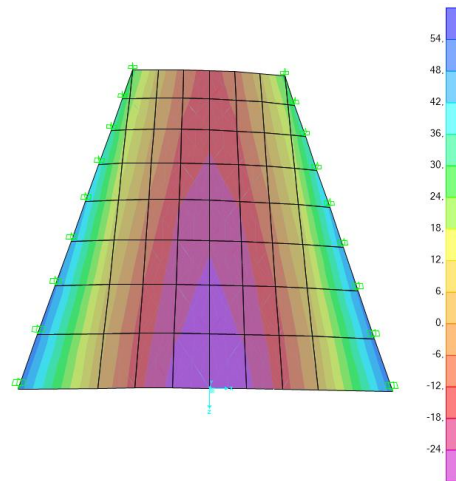
**Figura 67.** Deformada dovela clave empotrada *unidades en metro (x500)*



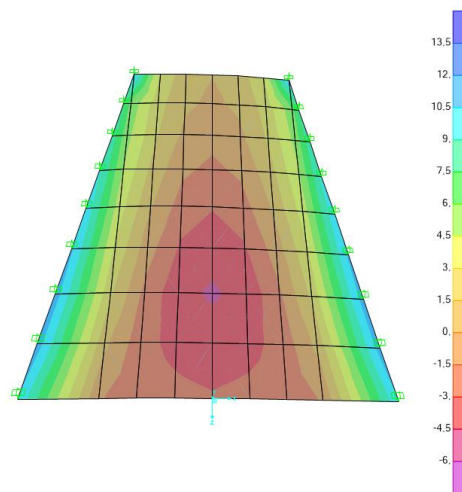
**Figura 68.** Esfuerzos F11 *unidades en kN/m*



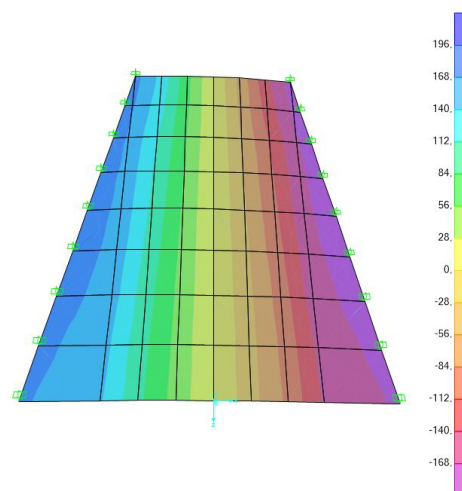
**Figura 69.** Esfuerzos F22 *unidades en kN/m*



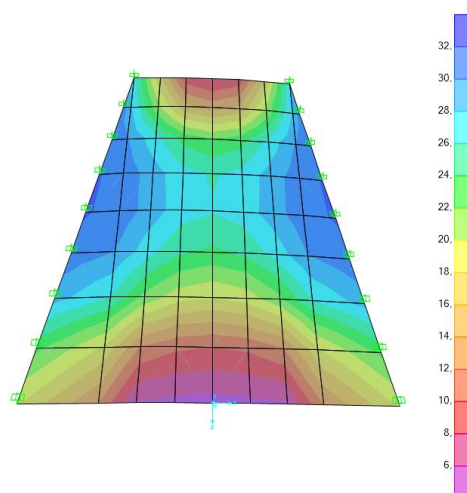
**Figura 70.** Esfuerzos M11 *unidades en kN-m/m*



**Figura 71.** Esfuerzos M22 *unidades en kN-m/m*



**Figura 72.** Esfuerzos V13 *unidades en kN/m*



**Figura 73.** Esfuerzos V23 unidades en kN/m

#### 4.4.3 Comparativa

A continuación, se mostrará una comparativa de los desplazamientos que se obtienen según la condición de contorno, que se imponga en la dovela clave.

Los puntos que se observan, en las *tablas 12 y 13*, corresponden al corte longitudinal de la Sección C, que aparece en la *figura 59*.

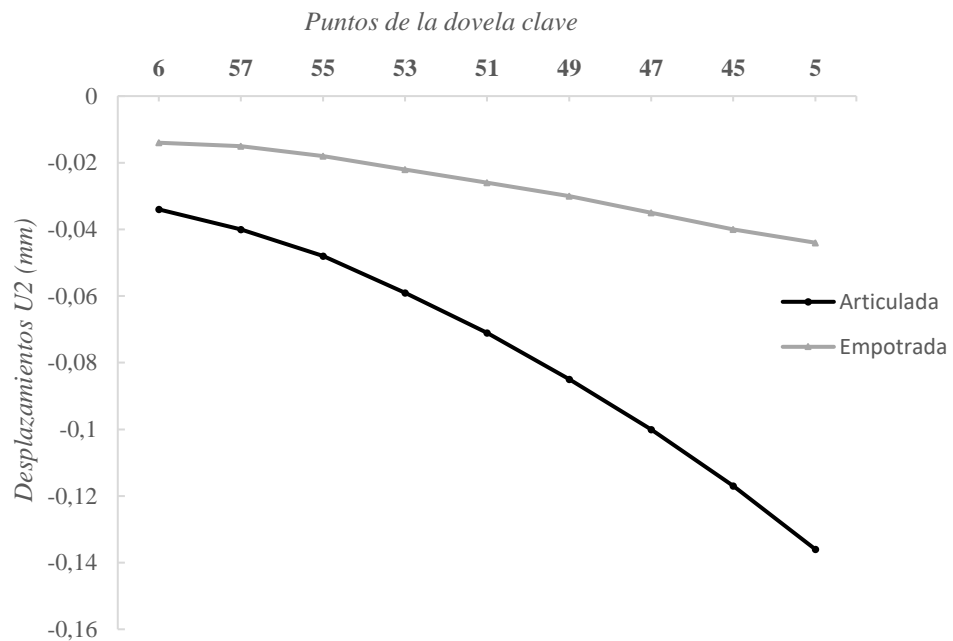
Punto	U1	U2	U3	R1	R2	R3
	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>
6	1,02E-13	-3,40E-05	-2,32E-07	2,50E-05	6,61E-11	1,46E-11
57	5,06E-13	-4,00E-05	-1,99E-08	3,70E-05	-5,35E-11	3,56E-11
55	8,48E-13	-4,80E-05	2,58E-07	4,80E-05	5,20E-11	6,12E-11
53	1,22E-12	-5,90E-05	5,89E-07	5,70E-05	-3,47E-11	9,21E-11
51	1,53E-12	-7,10E-05	9,87E-07	6,50E-05	3,75E-11	1,27E-10
49	1,94E-12	-8,50E-05	1,48E-06	7,20E-05	-2,09E-11	1,64E-10
47	2,46E-12	-1,00E-04	2,08E-06	7,90E-05	3,28E-11	2,01E-10
45	3,44E-12	-1,17E-04	2,75E-06	8,90E-05	-1,17E-11	2,38E-10
5	4,98E-12	-1,36E-04	3,49E-06	1,05E-04	3,46E-11	2,77E-10

**Tabla 12.** Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno articulada

Punto	U1	U2	U3	R1	R2	R3
	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>
6	2,71E-14	-1,40E-05	7,65E-09	3,67E-06	1,82E-13	-8,97E-13
57	1,82E-13	-1,50E-05	8,63E-08	7,08E-06	3,42E-12	5,31E-12
55	3,44E-13	-1,80E-05	1,82E-07	1,00E-05	1,68E-12	1,46E-11
53	5,59E-13	-2,20E-05	2,88E-07	1,30E-05	4,53E-12	2,72E-11
51	8,17E-13	-2,60E-05	4,16E-07	1,60E-05	3,66E-12	4,25E-11
49	1,11E-12	-3,00E-05	5,66E-07	1,70E-05	5,28E-12	5,94E-11
47	1,45E-12	-3,50E-05	7,51E-07	1,80E-05	4,59E-12	7,69E-11
45	1,89E-12	-4,00E-05	9,57E-07	1,90E-05	5,93E-12	9,45E-11
5	2,50E-12	-4,40E-05	1,17E-06	2,40E-05	5,45E-12	1,15E-10

**Tabla 13.** Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno empotrada

En referencia a las *tablas 12 y 13*, se debe mencionar que los desplazamientos U1, U2 y U3 que aparecen en las tablas anteriores, corresponden al movimiento circunferencial, radial y del eje del túnel, respectivamente.



**Gráfica 3.** Articulada vs Empotrada (Dovela clave)

En la *gráfica 3* se puede observar que la estructura con apoyos articulados tiende a deformarse 3 veces más que si fuese una estructura empotrada. Tal como pasaba en la dovela trapezoidal las deformaciones tienden a incrementarse a medida que van avanzando desde el borde superior hasta el borde inferior, debido a la geometría de la dovela clave que tiene una forma trapezoidal. Por lo tanto, el lado más largo tenderá a sufrir más deformaciones que el lado corto.

En referencia a la diferencia que se puede encontrar entre utilizar un apoyo articulado o empotrado, respecto a las deformaciones que se producen en la dirección del **eje Y**, es aproximadamente 3 veces mayor cuando se emplean condiciones de contorno articuladas en lugar de empotradas.

Respecto a los diagramas de esfuerzos que se producen sobre la superficie de la estructura, tanto si se impone un tipo de apoyo u otro, los resultados de colores temáticos son bastante similares para ambos casos; pero respecto al orden de magnitud de estos valores, sí que se puede apreciar una gran diferencia entre usar uno u otro. En el caso articulado se obtienen más esfuerzos de axil, momentos flectores y cortantes que en el caso empotrado.

Como se ha podido observar de los anteriores subapartados, el análisis de las dovelas individuales ha sido satisfactorio y se puede afirmar que los elementos funcionan correctamente.

Por consiguiente, se procederá a estudiar casos más complejos. A continuación, se muestra mediante un esquema gráfica en que fase se encuentra la tesina.



## **4.5 Formación de un anillo**

Una vez comprobado que los casos individuales funcionan correctamente, y donde, se han apreciado las diferencias que existen entre las diferentes tipologías de dovelas que forman un anillo. También se pudo apreciar la relevancia que tiene las condiciones de contorno que se imponga en los bordes de los elementos individuales.

El siguiente paso de esta investigación es el ensamblaje de los elementos individuales para poder formar un anillo entero y analizar su comportamiento estructural.

La formación se ha llevado a cabo tal como se ha explicado en los anteriores apartados, el anillo estará compuesto por 5 dovelas trapezoidales, 1 dovela paralelográfica y una clave, esta última es muy relevante dado que se encarga de cerrar el elemento estructural.

Las cargas que están aplicadas sobre la estructura son las que se consideran de mayor importancia, y las cuales siempre aparecen en todos los proyectos de esta tipología de obra lineal. Dichas cargas son las que genera el peso de la tierra y la presión hidrostática.

En general el modelo que se ha realizado, en el programa, es básicamente la unión de varios segmentos individuales, que forman un anillo entero y que están situados a 20 metros de profundidad.

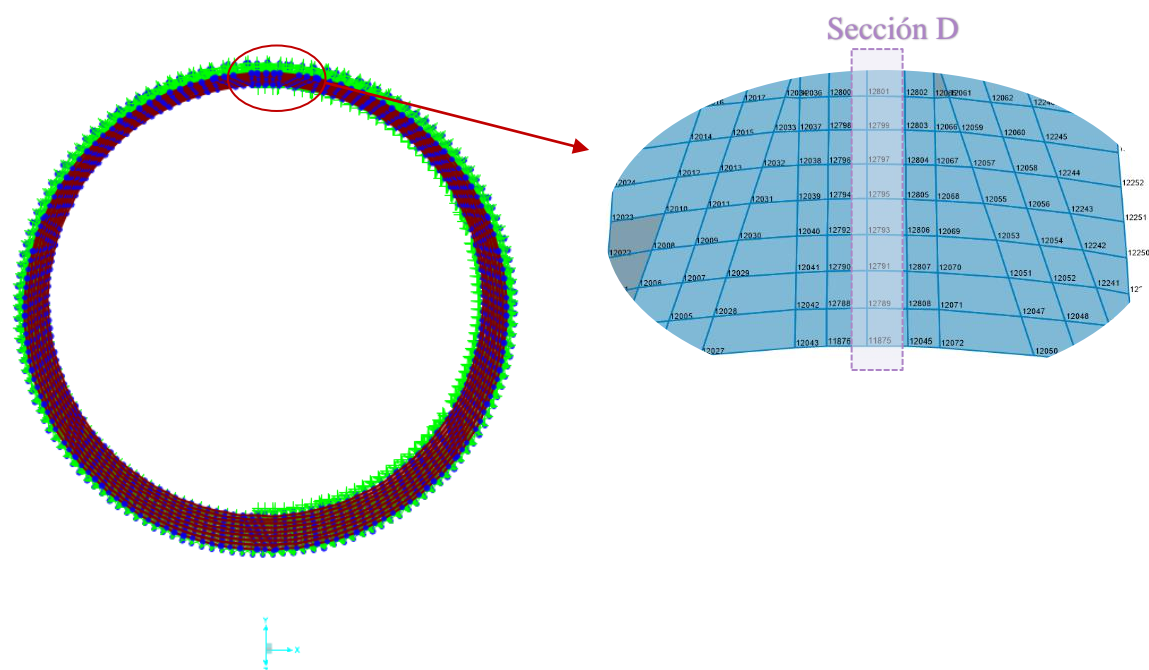
La condición de tierra que rodea la estructura, ha sido modelizada como muelles alrededor de toda la superficie exterior de los segmentos individuales (tal como se ha explicado en el apartado de metodología).

En la zona trasera del anillo se ha asignado condiciones de contorno con movimiento nulo, en el eje perpendicular al plano del anillo, de esta forma se está intentado simular el inicio de la construcción del primer anillo; donde siempre la estructura se apoya sobre un elemento provisional para poder transmitir los esfuerzos que generan los gatos, al intentar avanzar hacia adelante, en el proceso de excavación del túnel.

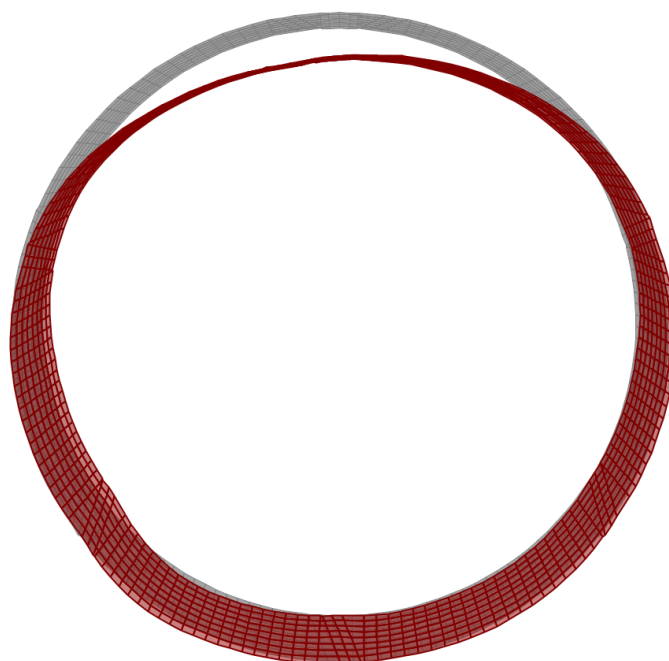
A continuación, se mostrará el diseño de la estructura en 3d mediante elementos finitos y también se observarán los resultados que se obtienen debido a las cargas a las que está sometida la estructura.

Obviamente, se estudiarán los dos principales casos que se ha planteado al inicio de este informe, es decir, la manera de modelar el contacto entre dovelas (juntas longitudinales) que hay dos tipos; articuladas o empotradas.

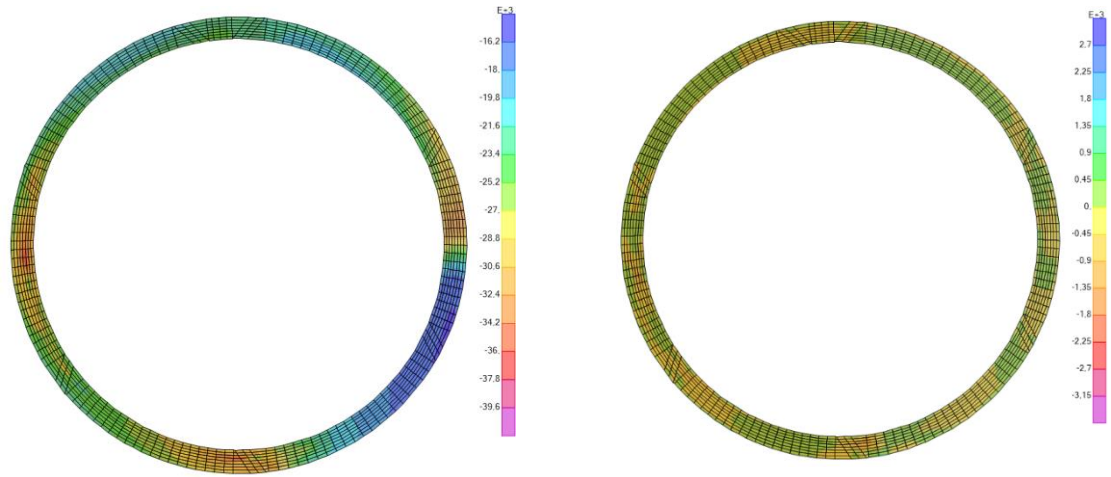




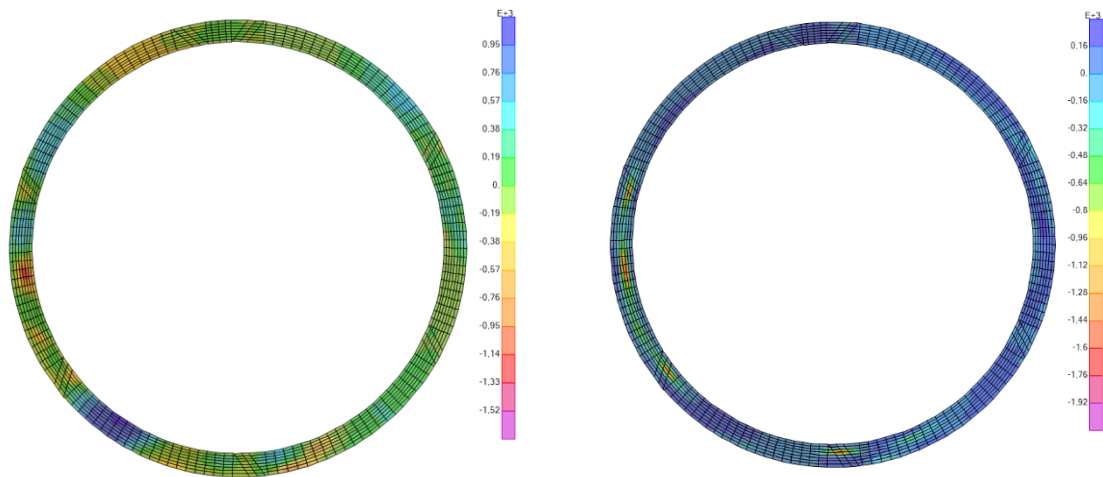
**Figura 74.** Modelo geométrico de un anillo y sección longitudinal D



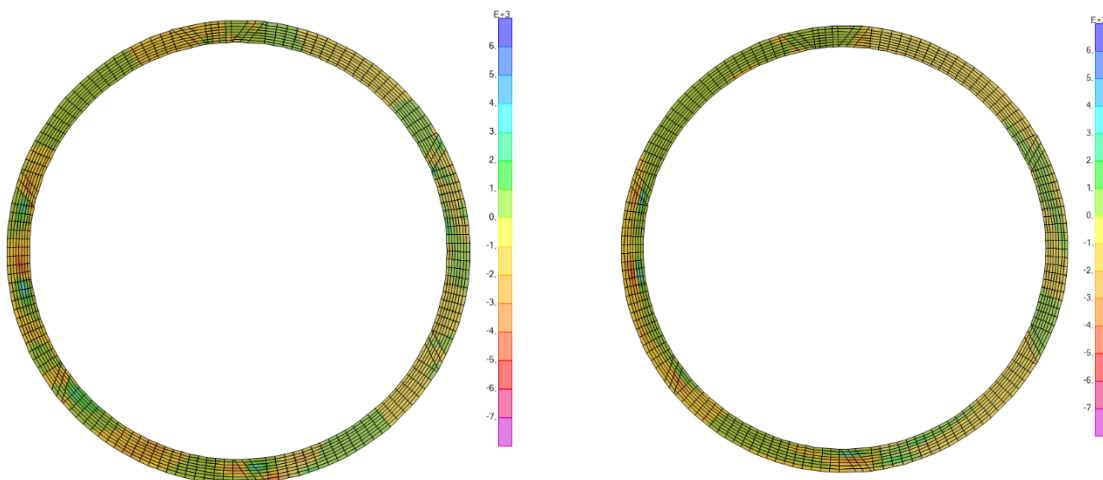
**Figura 75.** Deformación de un anillo en ELS (x20)



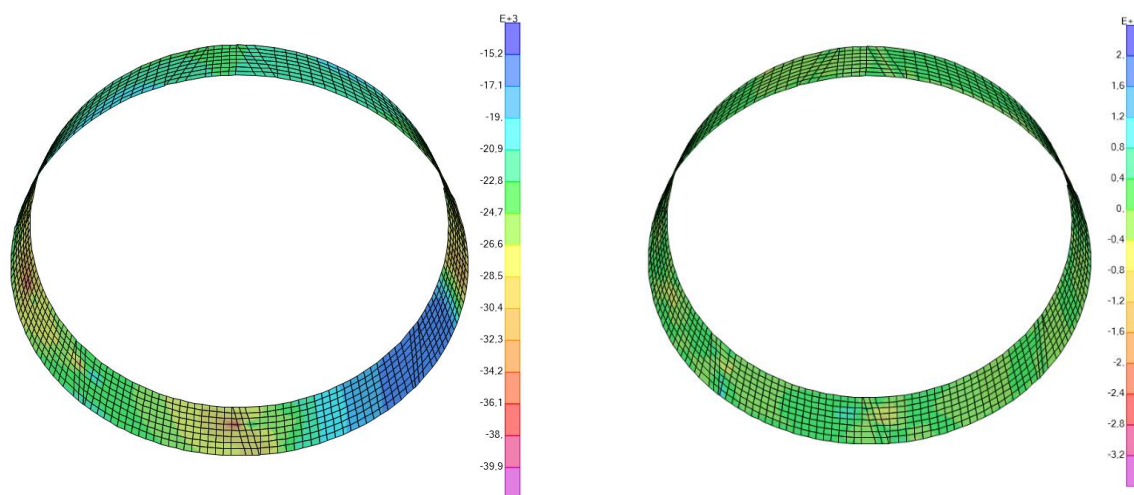
**Figura 76.** Esfuerzos F11 y F22 respectivamente *unidades en kN/m Articulado*



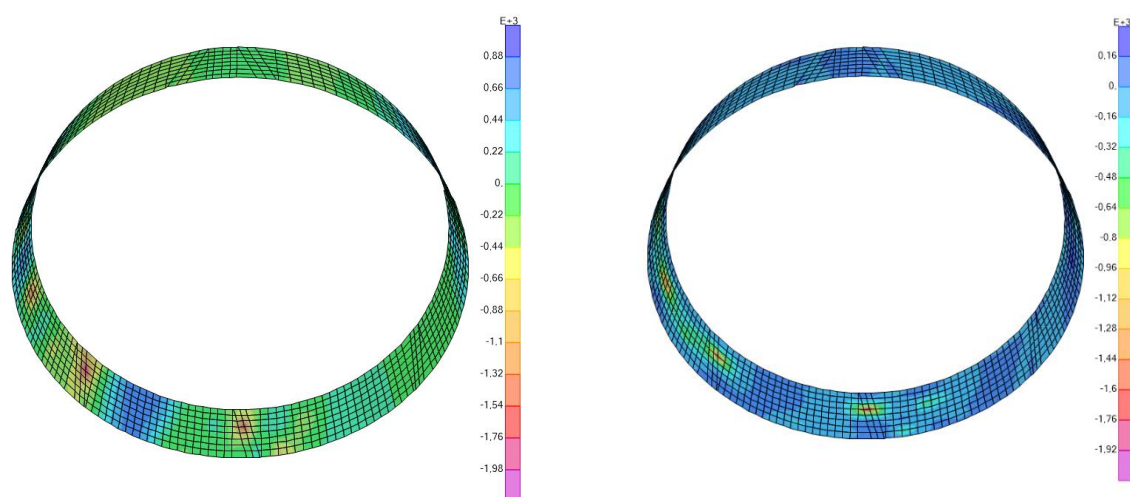
**Figura 77.** Esfuerzos M11 y M22 respectivamente *unidades en kN-m/m Articulado*



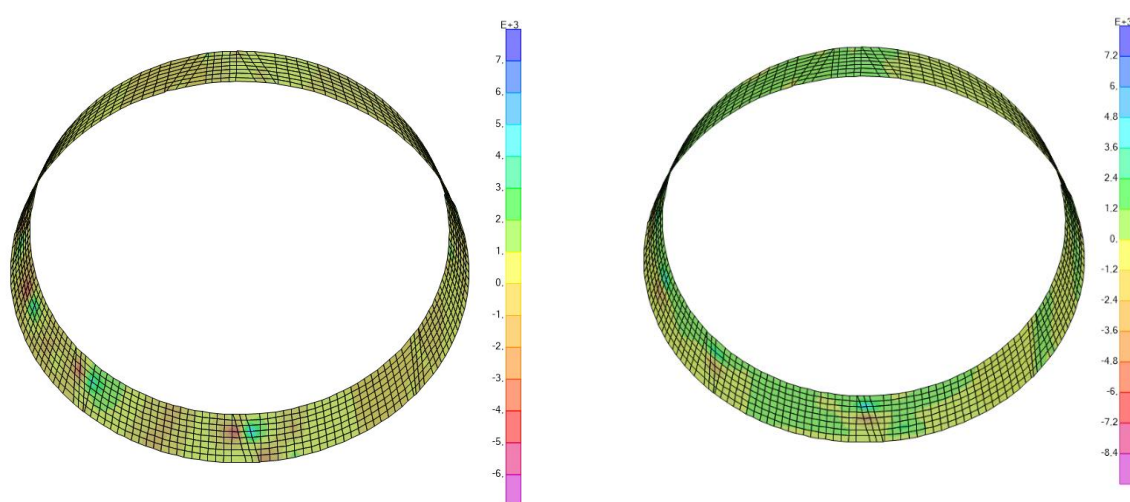
**Figura 78.** Esfuerzos V13 y V23 respectivamente *unidades en kN/m Articulado*



**Figura 79.** Esfuerzos  $F_{11}$  y  $F_{22}$  respectivamente unidades en  $kN/m$  Empotrado



**Figura 80.** Esfuerzos  $M_{11}$  y  $M_{22}$  respectivamente unidades en  $kN-m/m$  Empotrado



**Figura 81.** Esfuerzos  $V_{13}$  y  $V_{23}$  respectivamente unidades en  $kN/m$  Empotrado

#### 4.5.1 Comparativa

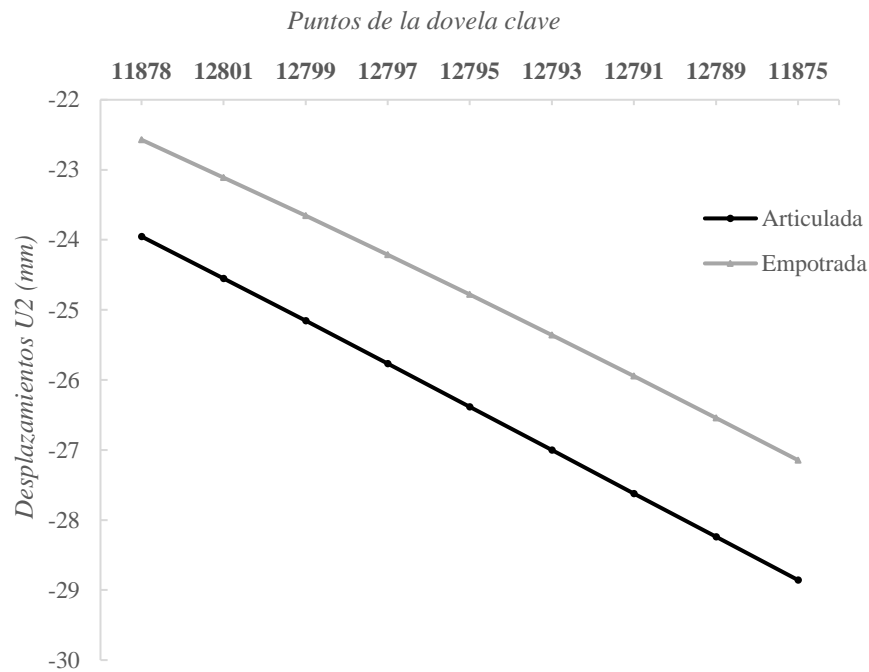
A continuación, se mostrará los desplazamientos más desfavorables que se localizan en la parte superior y centrada del anillo, que en este caso es donde se ubica la dovela clave. Los puntos escogidos en la *tabla 14* y *15* pertenecen a la sección D que aparece en la *figura 74*.

Punto	U1	U2	U3	R1	R2	R3
	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>
11878	-4,42E-03	-2,40E-02	2,35E-02	2,99E-03	4,58E-04	3,87E-03
12801	-4,32E-03	-2,46E-02	2,36E-02	2,99E-03	5,29E-04	3,94E-03
12799	-4,22E-03	-2,52E-02	2,37E-02	3,01E-03	4,63E-04	4,02E-03
12797	-4,13E-03	-2,58E-02	2,37E-02	3,03E-03	5,15E-04	4,09E-03
12795	-4,04E-03	-2,64E-02	2,38E-02	3,05E-03	4,69E-04	4,17E-03
12793	-3,95E-03	-2,70E-02	2,39E-02	3,07E-03	5,09E-04	4,25E-03
12791	-3,86E-03	-2,76E-02	2,39E-02	3,08E-03	4,83E-04	4,33E-03
12789	-3,76E-03	-2,82E-02	2,40E-02	3,08E-03	5,19E-04	4,43E-03
11875	-3,66E-03	-2,89E-02	2,41E-02	3,07E-03	4,96E-04	4,53E-03

**Tabla 14.** Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno articulada

Punto	U1	U2	U3	R1	R2	R3
	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>
11878	-4,69E-03	-2,26E-02	2,26E-02	2,68E-03	5,29E-04	2,12E-03
12801	-4,58E-03	-2,31E-02	2,27E-02	2,71E-03	6,06E-04	2,21E-03
12799	-4,47E-03	-2,37E-02	2,27E-02	2,75E-03	5,39E-04	2,30E-03
12797	-4,36E-03	-2,42E-02	2,28E-02	2,81E-03	5,91E-04	2,40E-03
12795	-4,26E-03	-2,48E-02	2,29E-02	2,86E-03	5,46E-04	2,51E-03
12793	-4,15E-03	-2,54E-02	2,30E-02	2,91E-03	5,83E-04	2,61E-03
12791	-4,04E-03	-2,59E-02	2,30E-02	2,96E-03	5,58E-04	2,72E-03
12789	-3,93E-03	-2,65E-02	2,31E-02	3,00E-03	5,92E-04	2,83E-03
11875	-3,82E-03	-2,71E-02	2,32E-02	3,03E-03	5,71E-04	2,93E-03

**Tabla 15.** Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno empotrada

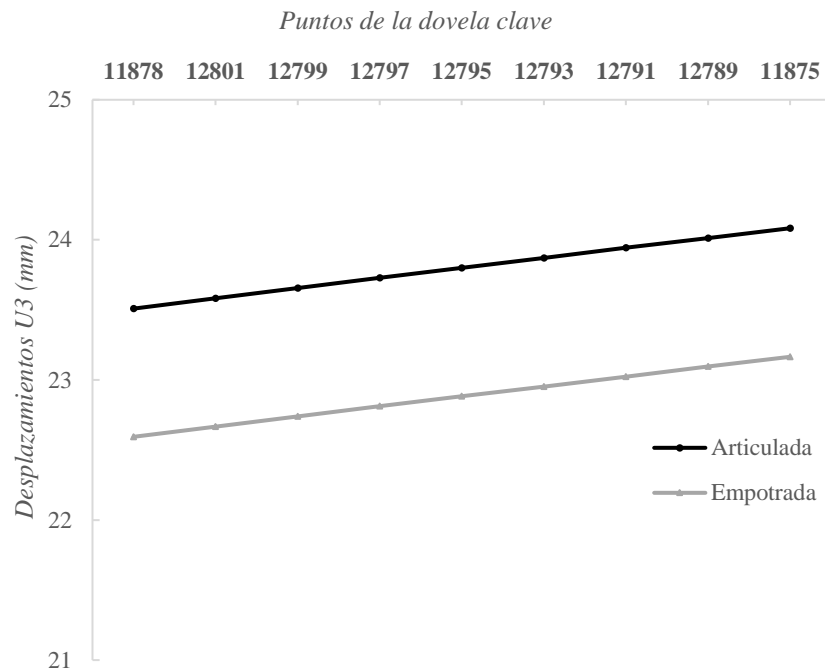


**Gráfica 4.** Articulada vs Empotrada (Dovela clave)

La *gráfica 4* representa los cortes longitudinales de una sección de la dovela clave, dicha sección está ubicada en el centro de la estructura en cuestión. La evolución que se aprecia en la gráfica anterior va desde el lado más corto al lado más largo (de la dovela clave).

Además, se ha representado de manera simultánea los dos tipos de casos analizados en esta tesina, con el mero objetivo de poder observar con claridad el comportamiento que representa la estructura cuando se modifica únicamente las condiciones de contorno.

Mediante el gráfico anterior, se observa que el anillo con juntas longitudinales articuladas tiende a deformarse más que en el caso empotrado, el orden de magnitud de diferencia entre ambos casos es de 2 mm.



**Gráfica 5.** Articulada vs Empotrada (Dovela clave) **Alabeo**

También se ha realizado una comparativa del efecto del alabeo entre los dos modelos, donde se puede afirmar gracias a la *gráfica 5*, que el anillo con juntas articuladas es más sensible al efecto del alabeo que el caso empotrado. En este caso la diferencia entre ambos casos es de 1 mm entre los diversos casos analizados.

Otro dato importante que se observa de la gráfica anterior, es que los puntos de la sección D más cercanos al borde largo de la dovela clave tienden alabearse más que el borde corto. Esto es debido a la condición de contorno que se ha restringido en el plano trasero, que contiene al anillo, que impide que la deformación en U3 tenga menos efecto sobre los puntos más cercanos a este plano.



## **4.6 Formación de dos anillos**

Una vez realizado el estudio completo de un anillo con sus pertinentes resultados, se procede a la formación de dos anillos que configuran el avance de la construcción del túnel.

Esta modelización se realiza una vez comprobado que el modelo anterior funciona correctamente, dado que esta obra lineal es bastante compleja para ser analizada en su totalidad, por esa razón se debe ir modelizando modelos simples hasta conseguir la estructura deseada.

En esta fase de modelaje, consiste básicamente en añadir un anillo más delante del que ya se había realizado. Esto simula el avance de la tuneladora y la posterior construcción del anillo mediante dovelas prefabricadas.

Cabe mencionar que en el primer anillo la dovela clave, está en el centro superior del anillo, pero para la construcción del siguiente anillo se ha decidido rotar aproximadamente unos 20 grados desde el centro de la circunferencia. De esta forma, se consigue realizar un modelo similar a la realidad y así, poder obtener resultados que suelen aparecer a pie de obra e intentar analizar dichos resultados y buscar un razonamiento lógico, de lo que está sucediendo a efectos estructurales.

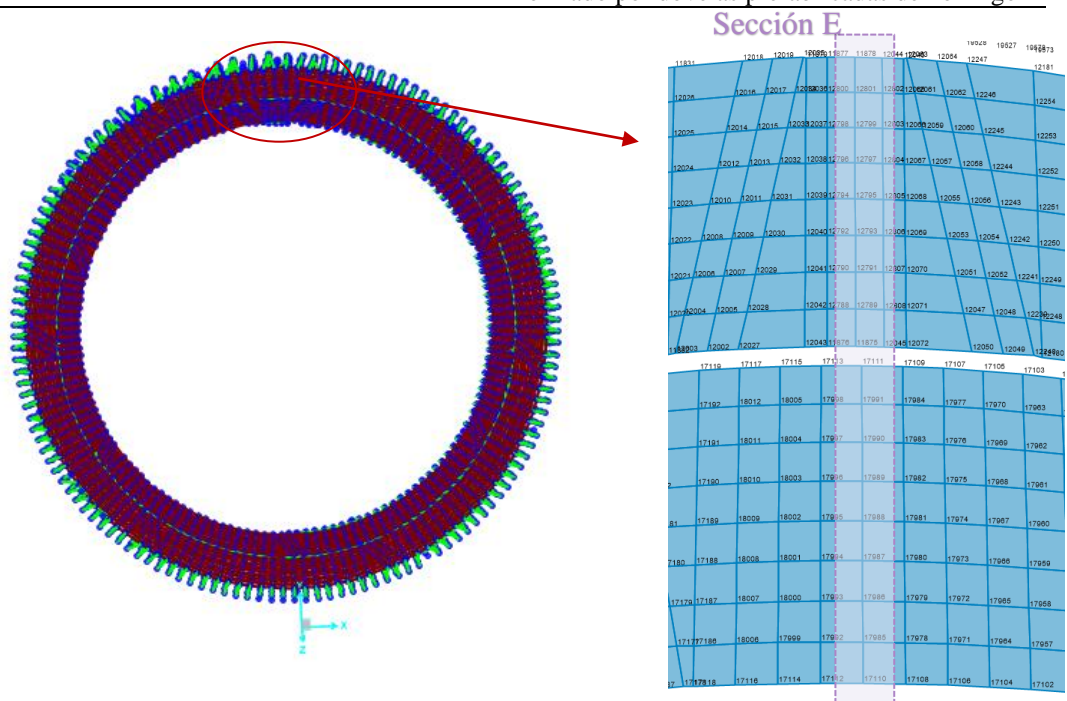
La construcción del nuevo anillo se ha realizado a 10 cm de separación del anillo posterior, donde se unen ambos anillos mediante unas barras longitudinales con las propiedades mecánicas comentadas en los apartados anteriores; estos elementos conectores simulan la junta transversal que separa el contacto entre anillos y se encarga de transmitir mutuamente esfuerzos y desplazamientos.

Respecto a las cargas que se simulan son idénticas al caso de un anillo; el peso del terreno, la presión hidrostática y el peso propio de los elementos resistentes.

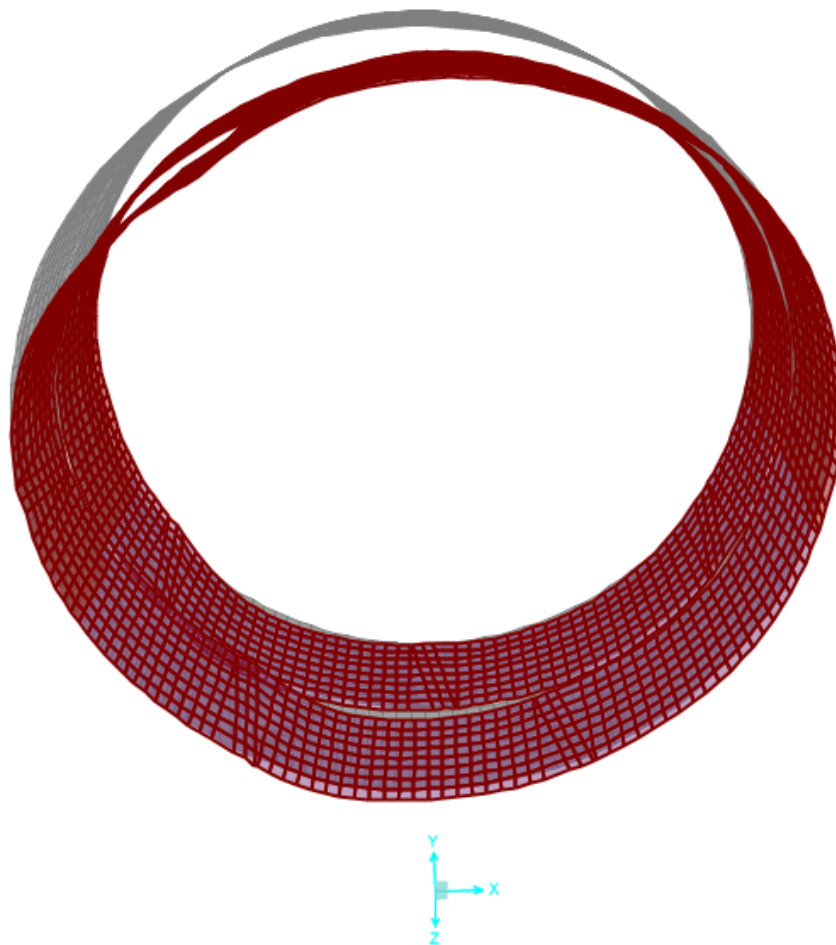
Tal como en el anterior caso, se compararán los modelos tanto con la condición de juntas articuladas como empotradas.

Para expresar de la mejor manera posible dichas comparaciones se mostrarán los resultados de manera gráfica en 3D y mediante gráficas lineales, donde se puede observar los resultados que se obtienen en ciertos puntos, considerados los más críticos de la estructura.

Remarcar que los nombres de los nodos de los puntos del Sap2000 han sido remplazados por números más pequeños, debido al espacio que ocupan en las gráficas evolutivas que aparecen a continuación.

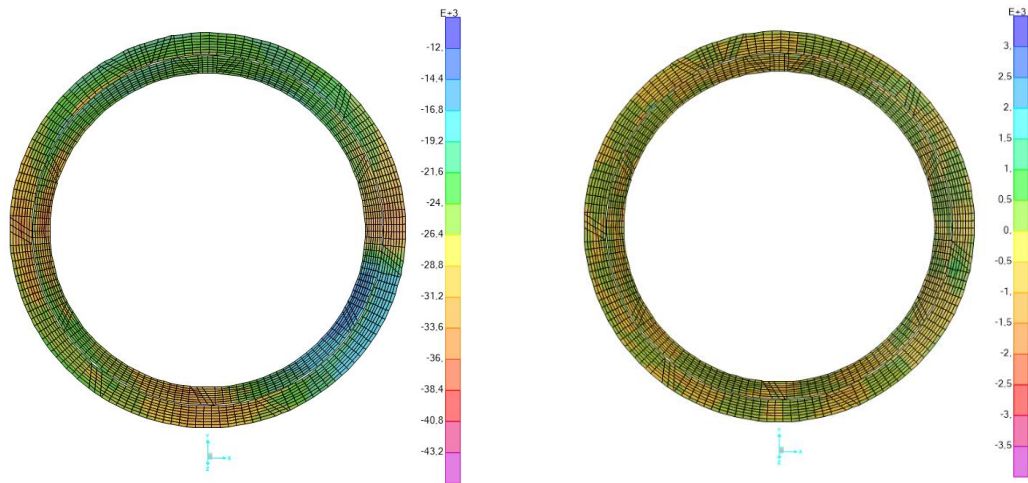


**Figura 82.** Modelo geométrico de dos anillos y sección longitudinal E

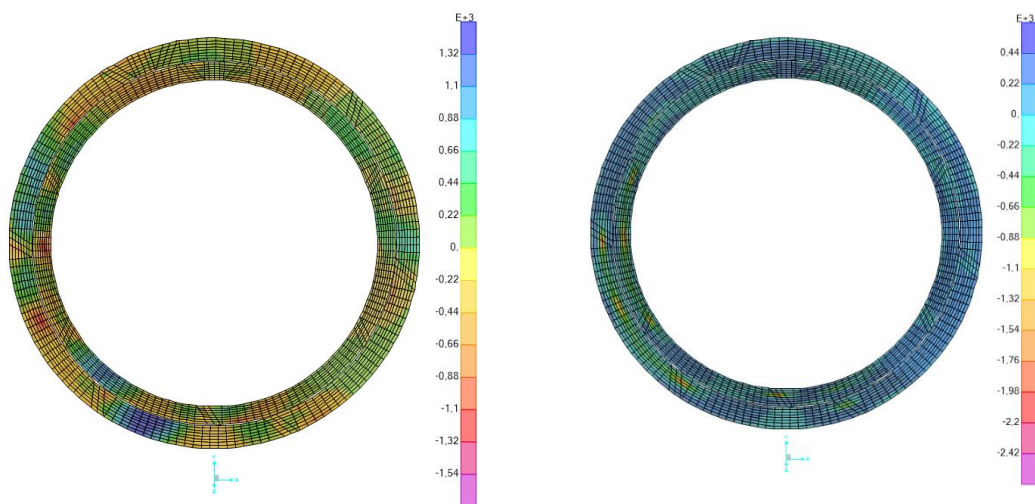


**Figura 83.** Deformación de dos anillos en ELS (x20)

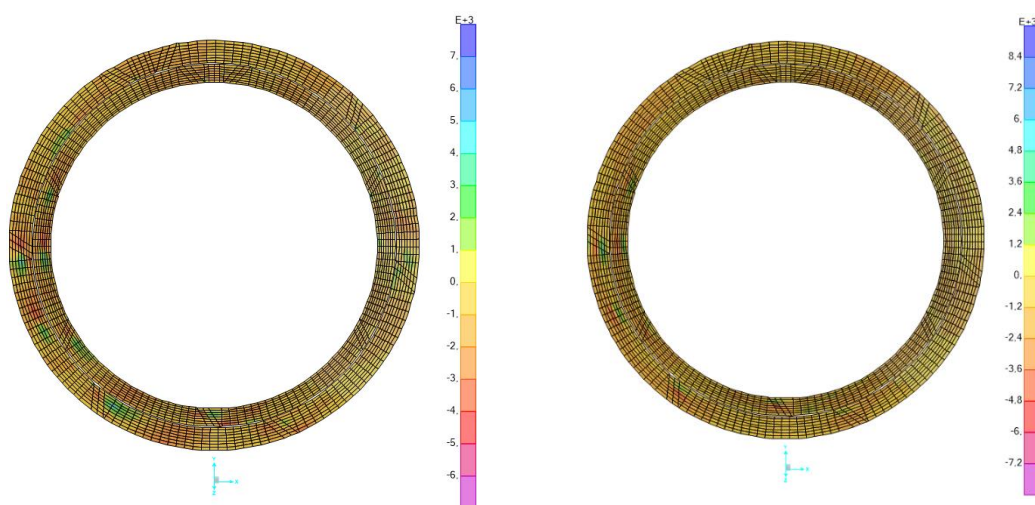




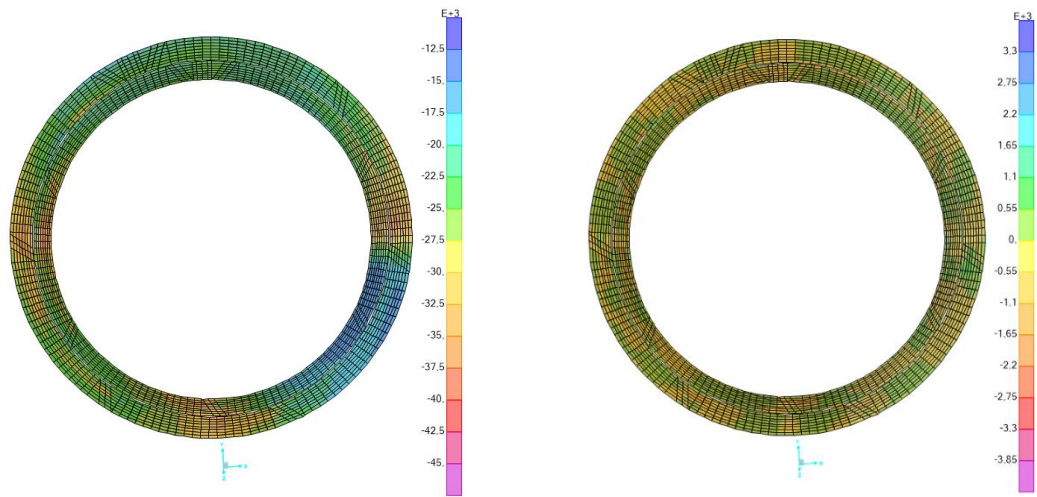
**Figura 84.** Esfuerzos  $F_{11}$  y  $F_{22}$  respectivamente *unidades en kN/m Articulado*



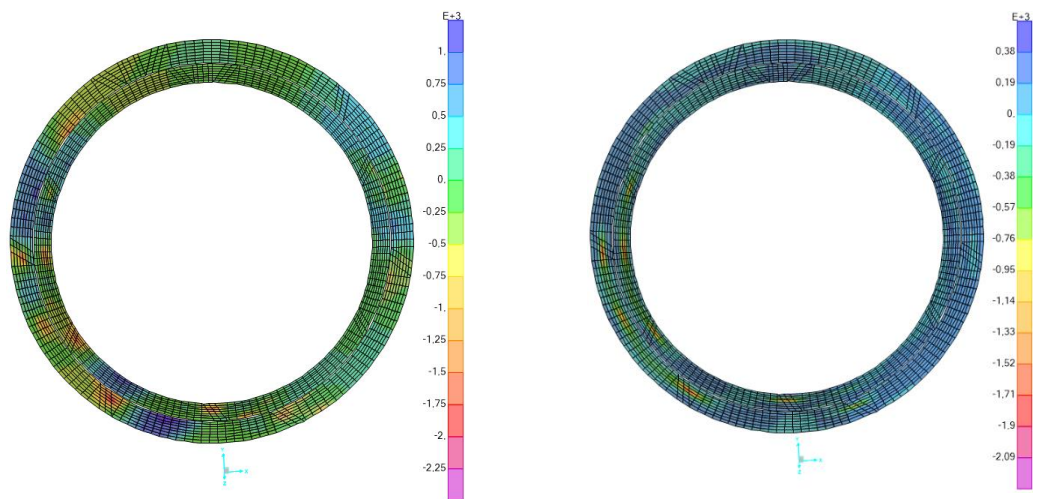
**Figura 85.** Esfuerzos  $M_{11}$  y  $M_{22}$  respectivamente *unidades en kN-m/m Articulado*



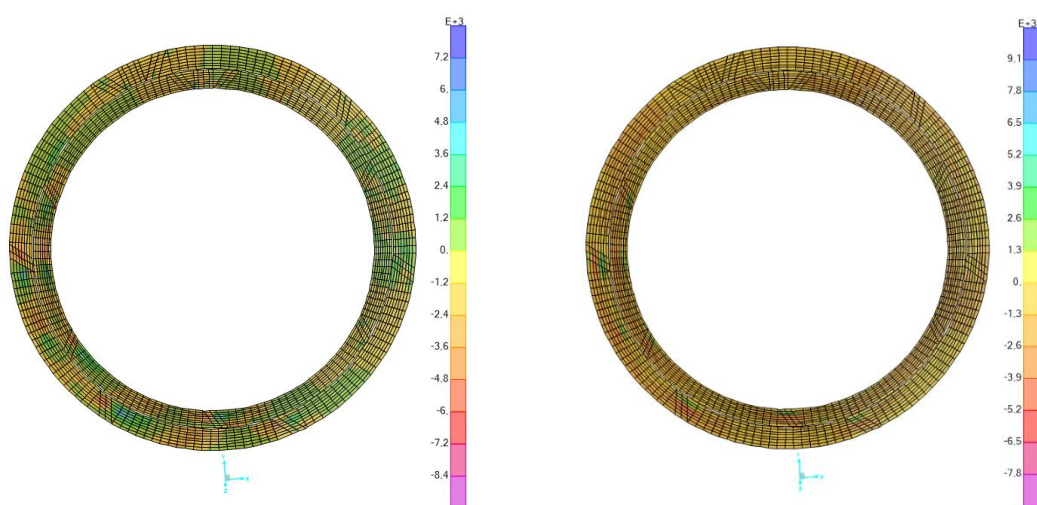
**Figura 86.** Esfuerzos  $V_{12}$  y  $V_{13}$  respectivamente *unidades en kN/m Articulado*



**Figura 87.** Esfuerzos  $F_{11}$  y  $F_{22}$  respectivamente *unidades en kN/m Empotrado*



**Figura 88.** Esfuerzos  $M_{11}$  y  $M_{22}$  respectivamente *unidades en kN-m/m Empotrado*



**Figura 89.** Esfuerzos  $V_{13}$  y  $V_{23}$  respectivamente *unidades en kN/m Empotrado*

#### 4.6.1 Comparativa

En este caso al ser una estructura formada por dos anillos, orientados de diferente manera, los cortes longitudinales pertenecerán a dos dovelas distintas. Por lo tanto, los datos que se pueden observar en las *tablas 16 y 17* corresponden los primeros nueve puntos a la sección de la dovela clave del primer anillo y, los siguientes nueve puntos forman parte de la sección de la dovela trapezoidal.

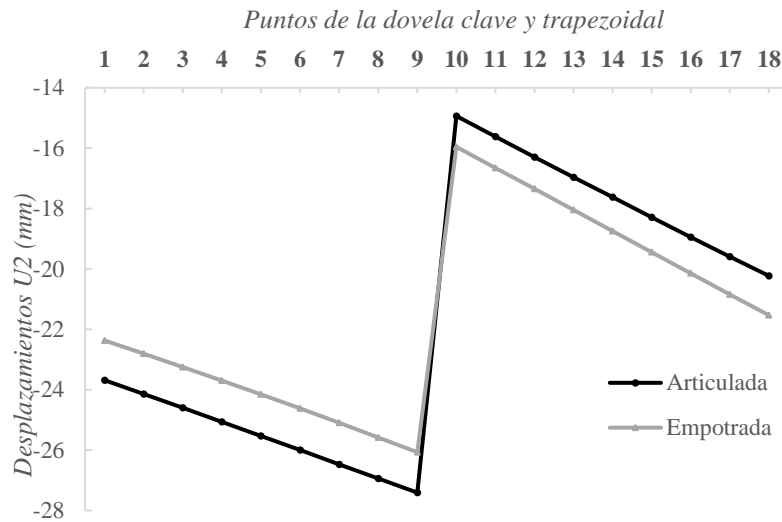
Los cortes longitudinales en ambos anillos están alineados y ubicados en la misma posición, centrada y en la parte superior, para poder comparar resultados entre los diferentes anillos.

Punto referencia	Punto	U1	U2	U3	R1	R2	R3
		<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>
1	11878	-3,44E-03	-2,37E-02	1,93E-02	2,26E-03	7,91E-04	4,94E-03
2	12801	-3,27E-03	-2,41E-02	1,93E-02	2,26E-03	8,37E-04	4,98E-03
3	12799	-3,12E-03	-2,46E-02	1,94E-02	2,28E-03	7,90E-04	5,02E-03
4	12797	-2,96E-03	-2,51E-02	1,95E-02	2,30E-03	8,28E-04	5,06E-03
5	12795	-2,80E-03	-2,55E-02	1,96E-02	2,31E-03	7,93E-04	5,10E-03
6	12793	-2,65E-03	-2,60E-02	1,96E-02	2,33E-03	8,25E-04	5,14E-03
7	12791	-2,49E-03	-2,65E-02	1,97E-02	2,33E-03	8,04E-04	5,19E-03
8	12789	-2,33E-03	-2,69E-02	1,98E-02	2,33E-03	8,35E-04	5,26E-03
9	11875	-2,17E-03	-2,74E-02	1,98E-02	2,32E-03	8,16E-04	5,35E-03
10	17111	-6,53E-03	-1,49E-02	2,77E-02	3,44E-03	-1,20E-03	3,76E-03
11	17991	-6,77E-03	-1,56E-02	2,78E-02	3,38E-03	-1,18E-03	3,79E-03
12	17990	-7,01E-03	-1,63E-02	2,78E-02	3,35E-03	-1,18E-03	3,83E-03
13	17989	-7,25E-03	-1,70E-02	2,79E-02	3,33E-03	-1,17E-03	3,86E-03
14	17988	-7,49E-03	-1,76E-02	2,80E-02	3,31E-03	-1,17E-03	3,89E-03
15	17987	-7,74E-03	-1,83E-02	2,81E-02	3,29E-03	-1,16E-03	3,91E-03
16	17986	-7,97E-03	-1,89E-02	2,81E-02	3,25E-03	-1,14E-03	3,93E-03
17	17985	-8,20E-03	-1,96E-02	2,82E-02	3,21E-03	-1,11E-03	3,95E-03
18	17110	-8,42E-03	-2,02E-02	2,83E-02	3,17E-03	-1,09E-03	3,97E-03

**Tabla 16.** Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno articulada

<b>Punto referencia</b>	<b>Punto</b>	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>
		<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>
1	<b>11878</b>	-3,91E-03	-2,24E-02	1,88E-02	2,16E-03	9,04E-04	2,68E-03
2	<b>12801</b>	-3,72E-03	-2,28E-02	1,89E-02	2,18E-03	9,59E-04	2,74E-03
3	<b>12799</b>	-3,54E-03	-2,32E-02	1,90E-02	2,22E-03	9,08E-04	2,81E-03
4	<b>12797</b>	-3,36E-03	-2,37E-02	1,91E-02	2,26E-03	9,47E-04	2,90E-03
5	<b>12795</b>	-3,18E-03	-2,42E-02	1,91E-02	2,31E-03	9,12E-04	2,98E-03
6	<b>12793</b>	-3,00E-03	-2,46E-02	1,92E-02	2,36E-03	9,42E-04	3,07E-03
7	<b>12791</b>	-2,82E-03	-2,51E-02	1,93E-02	2,39E-03	9,22E-04	3,16E-03
8	<b>12789</b>	-2,64E-03	-2,56E-02	1,93E-02	2,43E-03	9,52E-04	3,25E-03
9	<b>11875</b>	-2,45E-03	-2,61E-02	1,94E-02	2,45E-03	9,35E-04	3,35E-03
10	<b>17111</b>	-7,98E-03	-1,60E-02	2,72E-02	3,50E-03	-1,26E-03	3,64E-03
11	<b>17991</b>	-8,24E-03	-1,67E-02	2,73E-02	3,47E-03	-1,25E-03	3,68E-03
12	<b>17990</b>	-8,49E-03	-1,74E-02	2,73E-02	3,47E-03	-1,26E-03	3,71E-03
13	<b>17989</b>	-8,75E-03	-1,80E-02	2,74E-02	3,48E-03	-1,27E-03	3,75E-03
14	<b>17988</b>	-9,01E-03	-1,87E-02	2,75E-02	3,49E-03	-1,27E-03	3,78E-03
15	<b>17987</b>	-9,28E-03	-1,94E-02	2,75E-02	3,48E-03	-1,27E-03	3,82E-03
16	<b>17986</b>	-9,54E-03	-2,01E-02	2,76E-02	3,48E-03	-1,26E-03	3,86E-03
17	<b>17985</b>	-9,79E-03	-2,08E-02	2,77E-02	3,46E-03	-1,25E-03	3,90E-03
18	<b>17110</b>	-1,00E-02	-2,15E-02	2,78E-02	3,45E-03	-1,23E-03	3,94E-03

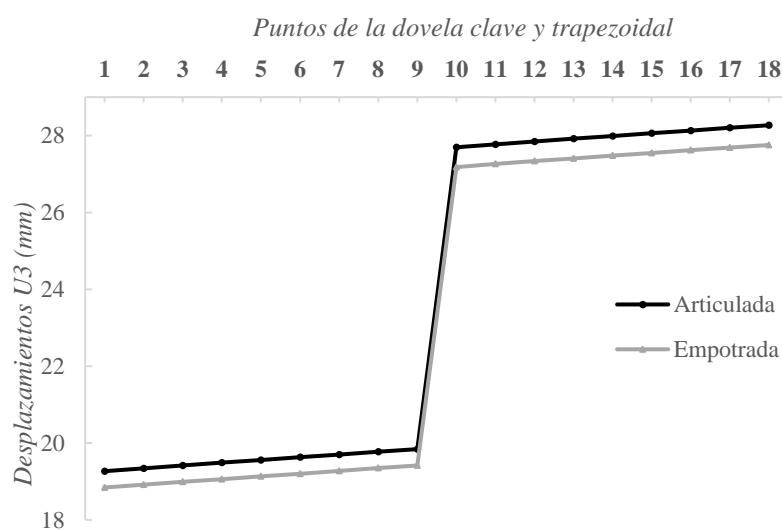
**Tabla 17.** Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno empotrada



**Gráfica 6.** Articulada vs Empotrada (Dovela clave y trapezoidal)

La interpretación que se puede realizar del *gráfico 6* es de gran ayuda para entender cómo influye la interacción de dos anillos, en los aspectos de deformaciones gravitacionales (eje Y).

Se observa que el primer anillo se comporta del mismo modo que en el anterior caso, donde la estructura con apoyos articulados tiene más deformaciones que el empotrado. En cambio, se aprecia un radical contraste en el comportamiento del segundo anillo. En este último, se aprecia como la estructura empotrada pasa a ser la que contiene más deformaciones en comparación con la articulada. El orden de magnitud en cuanto a diferencias en ambos casos es aproximadamente de 1,5 mm.



**Gráfica 7.** Articulada vs Empotrada (Dovela clave y trapezoidal) **Alabeo**

Respecto al comportamiento del alabeo que se puede apreciar en la *gráfica 7*, se sigue manteniendo el mismo patrón que en la *gráfica 5*, es decir, las estructuras tanto si están formadas por un anillo o por dos, las deformaciones que se producen fuera del plano que contiene el anillo (en dirección del eje Z) siempre tienen mayor efecto sobre elementos que emplean apoyos articulados en lugar de empotrados.

Cabe remarcar que, al modelizar un túnel con dos anillos, la interacción entre ambos anillos tiene un efecto estructural considerable. De la anterior gráfica se puede deducir que el segundo anillo tiende alabearse más que el primer anillo, el orden de diferencia entre ambos es de 8 mm.

En resumen, el primer anillo trabaja como si estuviera retenido por el efecto que provoca las condiciones de contorno del plano trasero del primer anillo y, en cambio el segundo anillo al estar solo condicionado por las juntas circunferenciales tiende a tener mayor deformabilidad en la dirección Z.



## 4.7 Formación de tres anillos

Para profundizar un poco más sobre el efecto del alabeo en túneles, se ha decidido modelizar un tercer anillo conjuntamente con los dos anteriores, y así ver el comportamiento estructural de un túnel de aproximadamente 5,10 metros de longitud ejecutado mediante una tuneladora y con elementos prefabricados.

Con este modelo analítico se pretende entender el comportamiento de un túnel frente a cargas generadas por el terreno, agua y el peso propio de la estructura. También se intenta averiguar cómo influye la interacción entre anillos frente al alabeo.

Cabe remarcar que esta última modelización se ha ejecutada de manera idéntica a las dos anteriores. En este último caso, la posición de la dovela clave se encuentra en la misma posición que el primer anillo, es decir, en la parte central superior de la circunferencia.

Más adelante se podrá observar los resultados, obtenidos del programa de elementos finitos, con sus correspondientes representaciones gráficas para poder destacar las principales diferencias entre el caso de juntas articuladas y juntas empotradas.

También se puede analizar cómo se comportan los nodos que forman los anillos individuales, de esta forma se puede observar cómo influye el comportamiento estructural, a lo largo del túnel y al mismo tiempo ver como interactúan entre ellos y ver la importancia que conlleva la tipología de juntas longitudinales.

Obviamente, los punto que se intentan comparar deben estar en la misma sección longitudinal en los 3 anillos.

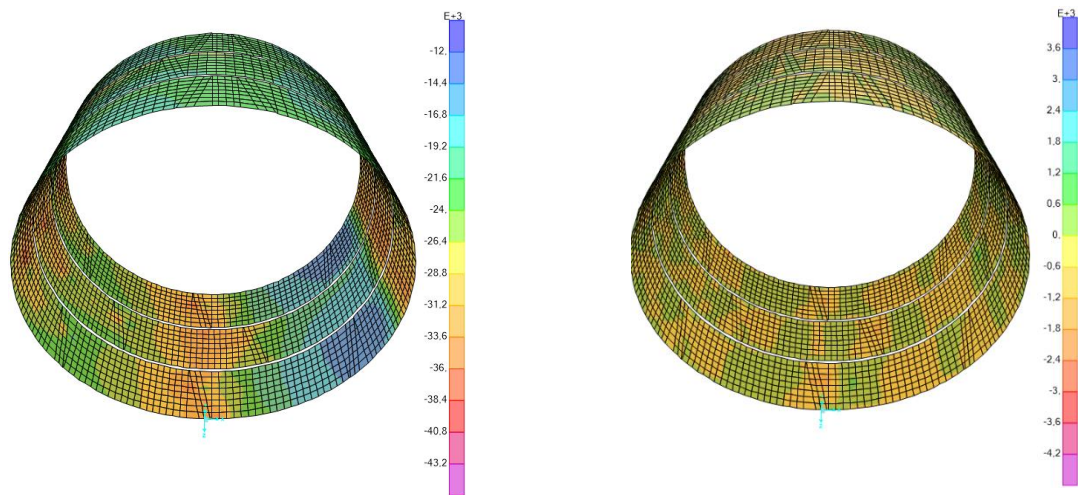
En la *figura 90* se puede observar los cortes longitudinales, que se han considerado de mayor importancia para observar las deformaciones circunferenciales, radiales y las que se producen fuera del plano del anillo.

Tal como se comentó en el subapartado anterior, el nombre de los nodos que se obtiene por defecto del Sap2000 han sido substituido por números más pequeños, todo esto se realiza para poder interpretar mejor las gráficas lineales que se encuentran más abajo.

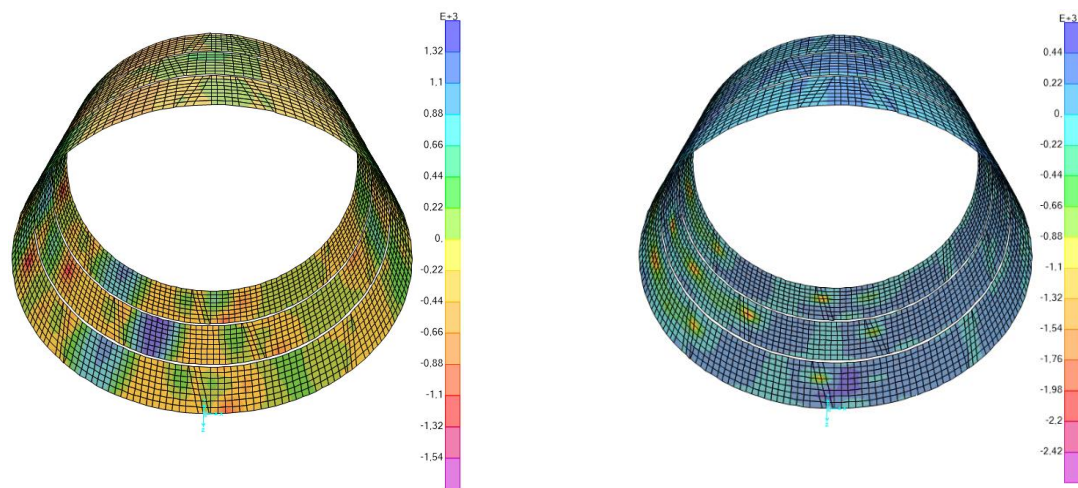


91

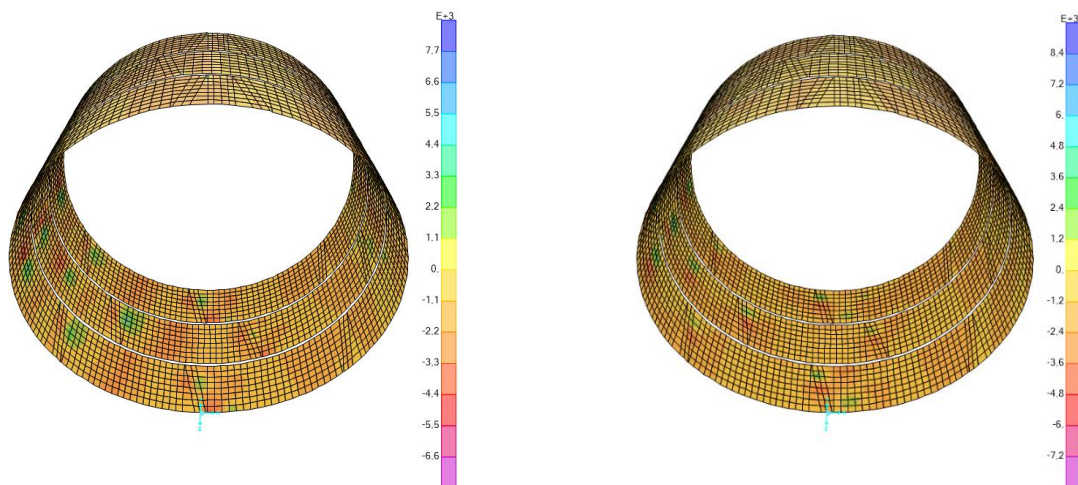




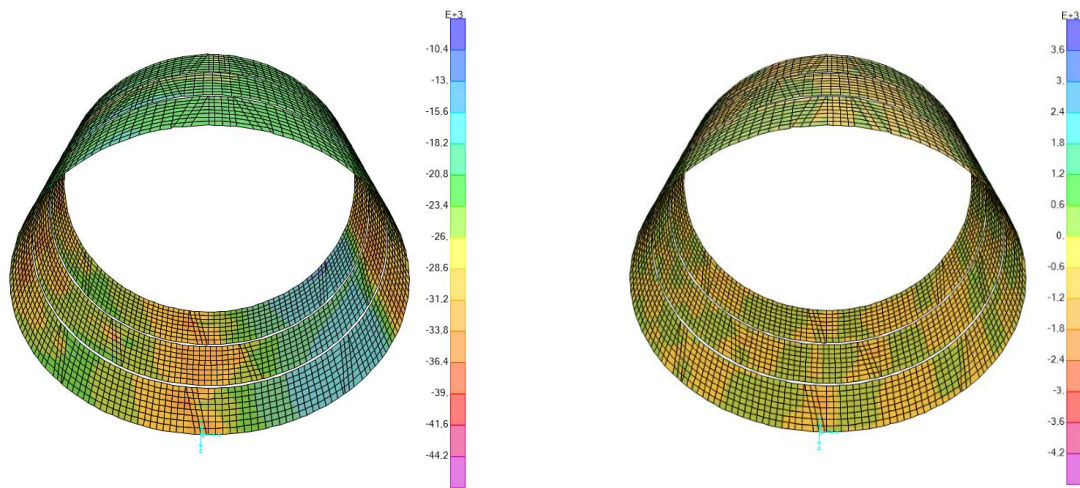
**Figura 92.** Esfuerzos  $F_{11}$  y  $F_{22}$  respectivamente *unidades en kN/m Articulado*



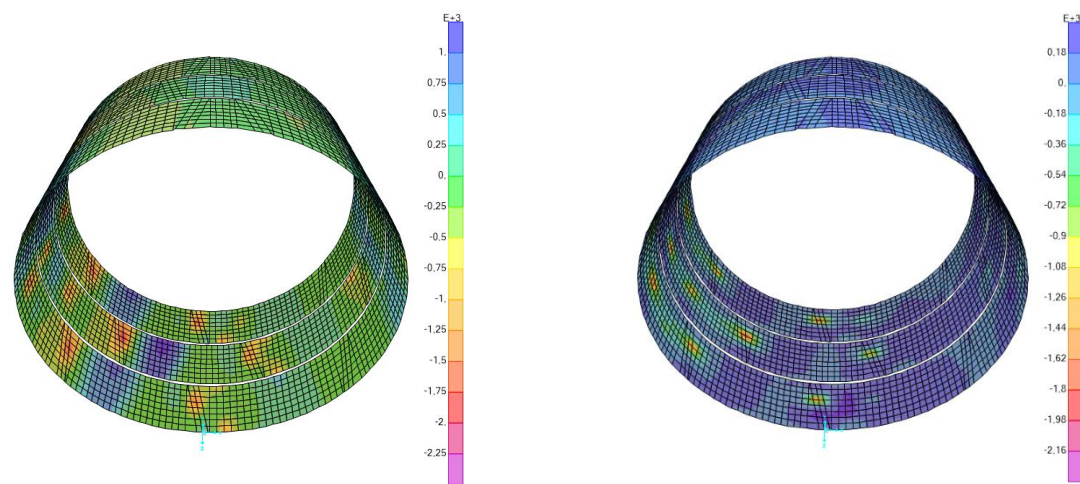
**Figura 93.** Esfuerzos  $M_{11}$  y  $M_{22}$  respectivamente *unidades en kN-m/m Articulado*



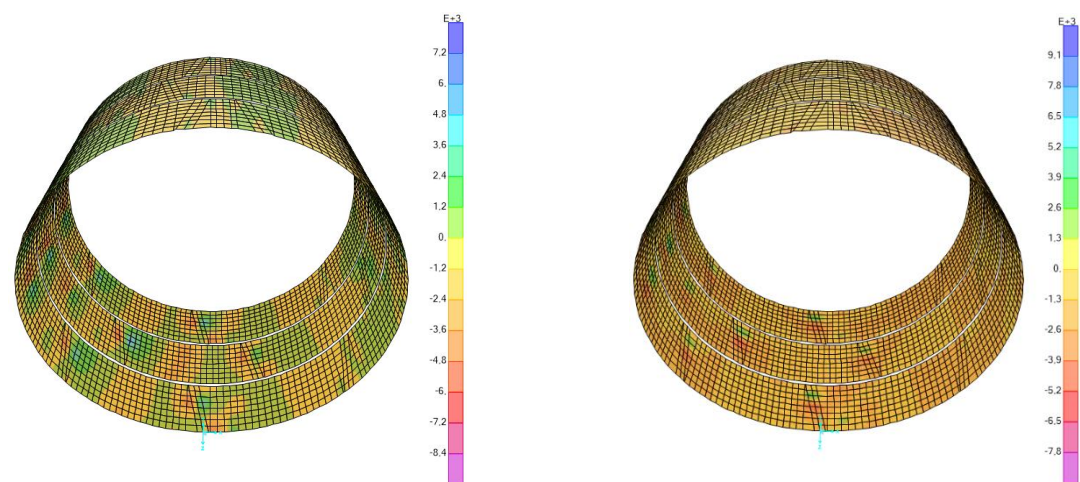
**Figura 94.** Esfuerzos  $V_{13}$  y  $V_{23}$  respectivamente *unidades en kN/m Articulado*



**Figura 95.** Esfuerzos F11 y F22 respectivamente *unidades en kN/m Empotrado*



**Figura 96.** Esfuerzos M11 y M22 respectivamente *unidades en kN-m/m Empotrado*



**Figura 97.** Esfuerzos V13 y V23 respectivamente *unidades en kN/m Empotrado*

#### 4.7.1 Comparativa

En este último análisis estructural, se verá los efectos de interacción entre tres anillos conectados mediante juntas circunferenciales. En las tablas que se muestran a continuación se recogen las translaciones y rotaciones de los 3 anillos, correspondientes a la *sección F*, que componen el túnel.

Tal como se ha explicada para el anterior caso, los nueve primer puntos corresponden al primer anillo, los siguientes nueve puntos pertenecen al segundo anillo y los nueve restantes forman parte del tercer anillo.

En este caso, los cortes longitudinales pertenecen a dos dovelas clave y una dovela trapezoidal, esta última corresponde al anillo ubicado en la zona central del modelo de la *figura 90*.

Punto referencia	Punto	U1	U2	U3	R1	R2	R3
		<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>
1	11878	-2,53E-03	-2,34E-02	1,55E-02	1,61E-03	1,05E-03	6,04E-03
2	12801	-2,32E-03	-2,37E-02	1,56E-02	1,61E-03	1,08E-03	6,05E-03
3	12799	-2,11E-03	-2,40E-02	1,57E-02	1,63E-03	1,04E-03	6,07E-03
4	12797	-1,90E-03	-2,44E-02	1,58E-02	1,65E-03	1,07E-03	6,08E-03
5	12795	-1,69E-03	-2,47E-02	1,58E-02	1,66E-03	1,04E-03	6,08E-03
6	12793	-1,49E-03	-2,51E-02	1,59E-02	1,68E-03	1,07E-03	6,10E-03
7	12791	-1,28E-03	-2,54E-02	1,60E-02	1,68E-03	1,05E-03	6,13E-03
8	12789	-1,07E-03	-2,57E-02	1,61E-02	1,68E-03	1,08E-03	6,18E-03
9	11875	-8,60E-04	-2,61E-02	1,61E-02	1,66E-03	1,06E-03	6,26E-03
10	17111	-6,79E-03	-1,53E-02	2,30E-02	3,02E-03	-1,06E-03	3,60E-03
11	17991	-7,00E-03	-1,59E-02	2,31E-02	2,96E-03	-1,04E-03	3,64E-03
12	17990	-7,22E-03	-1,65E-02	2,32E-02	2,93E-03	-1,04E-03	3,68E-03
13	17989	-7,43E-03	-1,70E-02	2,32E-02	2,92E-03	-1,03E-03	3,71E-03
14	17988	-7,65E-03	-1,76E-02	2,33E-02	2,90E-03	-1,03E-03	3,74E-03
15	17987	-7,86E-03	-1,82E-02	2,34E-02	2,88E-03	-1,02E-03	3,77E-03
16	17986	-8,07E-03	-1,88E-02	2,34E-02	2,84E-03	-1,00E-03	3,80E-03
17	17985	-8,27E-03	-1,93E-02	2,35E-02	2,81E-03	-9,69E-04	3,82E-03

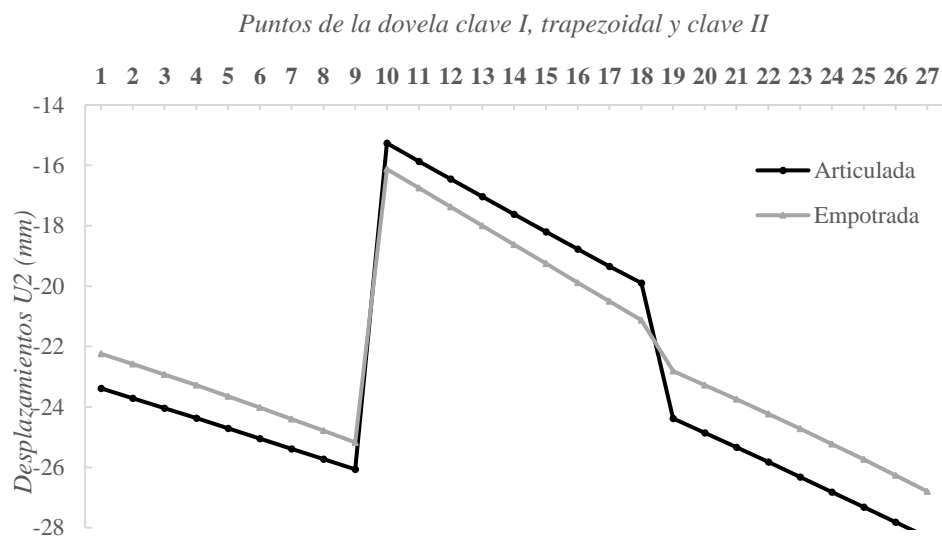
18	17110	-8,47E-03	-1,99E-02	2,36E-02	2,76E-03	-9,52E-04	3,84E-03
19	172	-4,40E-03	-2,44E-02	2,79E-02	2,39E-03	8,54E-04	3,95E-03
20	1099	-4,22E-03	-2,49E-02	2,79E-02	2,39E-03	9,02E-04	3,99E-03
21	1097	-4,05E-03	-2,53E-02	2,80E-02	2,41E-03	8,57E-04	4,04E-03
22	1095	-3,88E-03	-2,58E-02	2,81E-02	2,43E-03	8,93E-04	4,09E-03
23	1093	-3,71E-03	-2,63E-02	2,81E-02	2,44E-03	8,62E-04	4,13E-03
24	1091	-3,54E-03	-2,68E-02	2,82E-02	2,46E-03	8,90E-04	4,18E-03
25	1089	-3,37E-03	-2,73E-02	2,83E-02	2,48E-03	8,72E-04	4,23E-03
26	1087	-3,19E-03	-2,78E-02	2,84E-02	2,49E-03	8,97E-04	4,30E-03
27	169	-3,02E-03	-2,83E-02	2,84E-02	2,48E-03	8,81E-04	4,38E-03

**Tabla 18.** Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno articulada

Punto referencia	Punto	U1	U2	U3	R1	R2	R3
		<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>	<i>Radianes</i>
1	11878	-3,26E-03	-2,22E-02	1,61E-02	1,71E-03	1,02E-03	3,08E-03
2	12801	-3,05E-03	-2,26E-02	1,62E-02	1,73E-03	1,06E-03	3,13E-03
3	12799	-2,85E-03	-2,29E-02	1,62E-02	1,76E-03	1,02E-03	3,18E-03
4	12797	-2,65E-03	-2,33E-02	1,63E-02	1,80E-03	1,05E-03	3,24E-03
5	12795	-2,45E-03	-2,36E-02	1,64E-02	1,84E-03	1,02E-03	3,31E-03
6	12793	-2,25E-03	-2,40E-02	1,65E-02	1,88E-03	1,04E-03	3,38E-03
7	12791	-2,04E-03	-2,44E-02	1,65E-02	1,91E-03	1,03E-03	3,45E-03
8	12789	-1,84E-03	-2,48E-02	1,66E-02	1,94E-03	1,05E-03	3,53E-03
9	11875	-1,63E-03	-2,52E-02	1,67E-02	1,95E-03	1,04E-03	3,62E-03
10	17111	-8,22E-03	-1,61E-02	2,34E-02	3,14E-03	-1,10E-03	3,51E-03
11	17991	-8,44E-03	-1,68E-02	2,34E-02	3,11E-03	-1,09E-03	3,55E-03
12	17990	-8,66E-03	-1,74E-02	2,35E-02	3,11E-03	-1,10E-03	3,59E-03
13	17989	-8,89E-03	-1,80E-02	2,36E-02	3,12E-03	-1,11E-03	3,63E-03
14	17988	-9,12E-03	-1,86E-02	2,36E-02	3,13E-03	-1,11E-03	3,67E-03
15	17987	-9,36E-03	-1,93E-02	2,37E-02	3,12E-03	-1,11E-03	3,71E-03
16	17986	-9,58E-03	-1,99E-02	2,38E-02	3,12E-03	-1,10E-03	3,75E-03

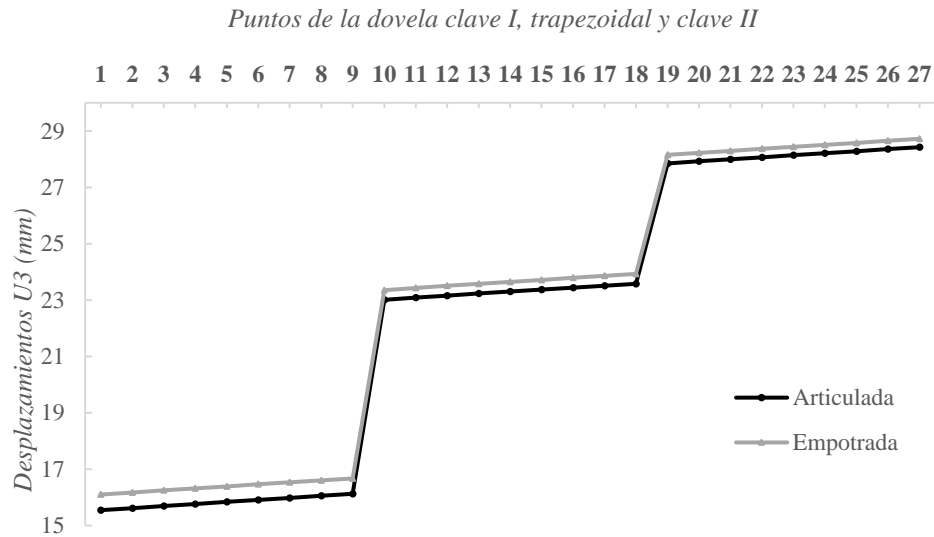
17	17985	-9,81E-03	-2,05E-02	2,39E-02	3,11E-03	-1,08E-03	3,79E-03
18	17110	-1,00E-02	-2,11E-02	2,39E-02	3,09E-03	-1,07E-03	3,83E-03
19	172	-4,77E-03	-2,28E-02	2,82E-02	2,31E-03	8,69E-04	2,11E-03
20	1099	-4,59E-03	-2,33E-02	2,82E-02	2,34E-03	9,31E-04	2,18E-03
21	1097	-4,41E-03	-2,37E-02	2,83E-02	2,39E-03	8,78E-04	2,26E-03
22	1095	-4,24E-03	-2,42E-02	2,84E-02	2,44E-03	9,20E-04	2,34E-03
23	1093	-4,06E-03	-2,47E-02	2,84E-02	2,50E-03	8,85E-04	2,43E-03
24	1091	-3,89E-03	-2,52E-02	2,85E-02	2,55E-03	9,14E-04	2,51E-03
25	1089	-3,71E-03	-2,57E-02	2,86E-02	2,60E-03	8,94E-04	2,60E-03
26	1087	-3,53E-03	-2,63E-02	2,87E-02	2,64E-03	9,20E-04	2,69E-03
27	169	-3,35E-03	-2,68E-02	2,87E-02	2,67E-03	9,04E-04	2,78E-03

**Tabla 19.** Desplazamientos y rotaciones con la condición de contorno empotrada



Del *gráfico 8* se puede observar que sigue manteniendo el mismo patrón que el caso del túnel de dos anillos, pero en el tercer anillo se vuelve a producir un intercambio de roles, es decir, en este último la estructura articulada tiende a tener mayor deformabilidad en el **eje Y**.

Además, se observa que independientemente de las condiciones de contorno, el anillo que se encuentra en el medio tiende a deformarse menos que los anillos exteriores. Es como si estuviera encastado en medio de dos elementos rígidos, que le dificultan sus translaciones.



**Gráfica 9.** Articulada vs Empotrada (Dovela clave I, trapezoidal y clave II) **Alabeo**

De esta última gráfica, se puede concluir que el efecto del alabeo no varía en función del tipo de apoyo que se imponga en las juntas longitudinales.

En resumen, los modelos articulados tienden a deformarse más en el **eje Z** respecto los casos empotrados.

Otro factor importante de los resultados gráficos obtenidos, es que el efecto del alabeo es acumulativo y, por lo tanto, el tercer anillo es el que tiende alabearse más en comparación con el resto de anillos que forman parte del túnel.

Además, se observa que la diferencia que existe en el alabeo respecto el primer anillo y el segundo es considerable, pero con la construcción del tercer componente se puede observar que dicha diferencia disminuye considerablemente.

Por lo tanto, se puede predecir que el efecto del alabeo puede llegar a estabilizarse con un número determinado de anillos que formen parte del túnel.



## 4.8 Introducción de gatos

Una vez finalizado los casos propuestos al inicio de esta tesina, que son la modelización del túnel por partes empezando desde el más básico hasta el más complejo.

Los resultados obtenidos y que más se esperaban, es la deformación que sufre el anillo en dirección perpendicular a su plano de trabajo, este efecto se le denomina alabeo.

Por lo tanto, en todos los modelos realizados mediante el Sap2000 se obtienen ciertas deformaciones que constituyen el efecto del alabeo, en el programa de elementos finitos correspondería a las deformaciones producidas sobre el eje Z.

Los resultados obtenidos en la presente tesina, muestran que en todos los casos el túnel tiende a tener un alabeo en la dirección de avance de la tuneladora, es decir, en la dirección Z positiva que es el eje global de modelización dentro del programa. La comparativa sobre el efecto que tienen las juntas sobre el alabeo están graficadas y explicadas de manera óptima en los apartados anteriores.

En el presente apartado, se pretende incorporar la modelización de los gatos, es decir, la introducción de la fuerza de los gatos cuando se intenta avanzar en la construcción del túnel. De esta forma también se intenta investigar el efecto estructural que conlleva cierta fuerza de gatos sobre la estructura en cuestión.

A priori, las fuerzas que generan los gatos hidráulicos deberían disminuir el efecto del alabeo que se produce sobre la estructura analizada.

En esta fase se introducirán 3 casos de cargas de gatos que corresponden a una fuerza total de gatos 9.000 kN, 60.000 kN y 90.000 kN, denominadas cargas mínimas, nominales y de desbloqueo, respectivamente.

Obviamente, en los tres casos la fuerza total se dividirá en 19 partes, es decir, en el programa se aplicarán 3 fuerzas puntuales por dovela y una fuerza puntual en la dovela llave que se encarga de cerrar la estructura. Esto se puede observar gráficamente en la *figura 98*, donde se aprecia la distribución de los gatos en una estructura tridimensional.

También se intentará averiguar la fuerza total de gatos necesaria para anular el efecto del alabeo, esto es un tema de gran importancia, a tener en cuenta en la fase constructiva. Con todos estos datos, se pueden llegar a entender los comportamientos estructurales de estas tipologías de estructuras y también poder obtener unas conclusiones bastante apropiadas a las que suceden en la realidad.



Cabe remarcar que la fuerza necesaria básica para que una tuneladora normal avance es de 9.000 kN, es decir, se está modelizando con una carga mínima y se va aumentando gradualmente hasta encontrar la más óptima.

El valor de la fuerza de los gatos hidráulicos depende de la resistencia que opone el suelo, a la hora de realizar la tarea de avance en la construcción de un túnel. Normalmente, para suelos blandos es necesario aplicar poca fuerza dado que no ofrece gran resistencia para ser excavada, en cambio, cuando la obra se ejecuta en terrenos constituidos por roca dura se necesita más fuerza en los gatos para poder avanzar.

Como idea general, durante la construcción de los anillos se puede observar que habrá secciones que tiendan abrirse (efecto alabeo) y otras que tiendan a cerrarse. Por lo tanto, el efecto que tiene la fuerza que generan los gatos es de vital importancia para corregir ciertas deformaciones indeseadas en este tipo de infraestructuras.

Por eso siempre se intenta construir los anillos de manera que las secciones que tiendan abrirse coincidan con las secciones que tiende a cerrarse y así anular el efecto del alabeo en ciertas zonas críticas.

Normalmente, los suelos blandos con un nivel freático en la cota superior son los peores para la construcción de un túnel, dado que la estructura tenderá a abrirse y no se podrá corregir dichos desplazamientos con los gatos porque el suelo no tiene suficiente capacidad resisten para soportar los esfuerzos que generarían los gatos hidráulicos en modo avance.

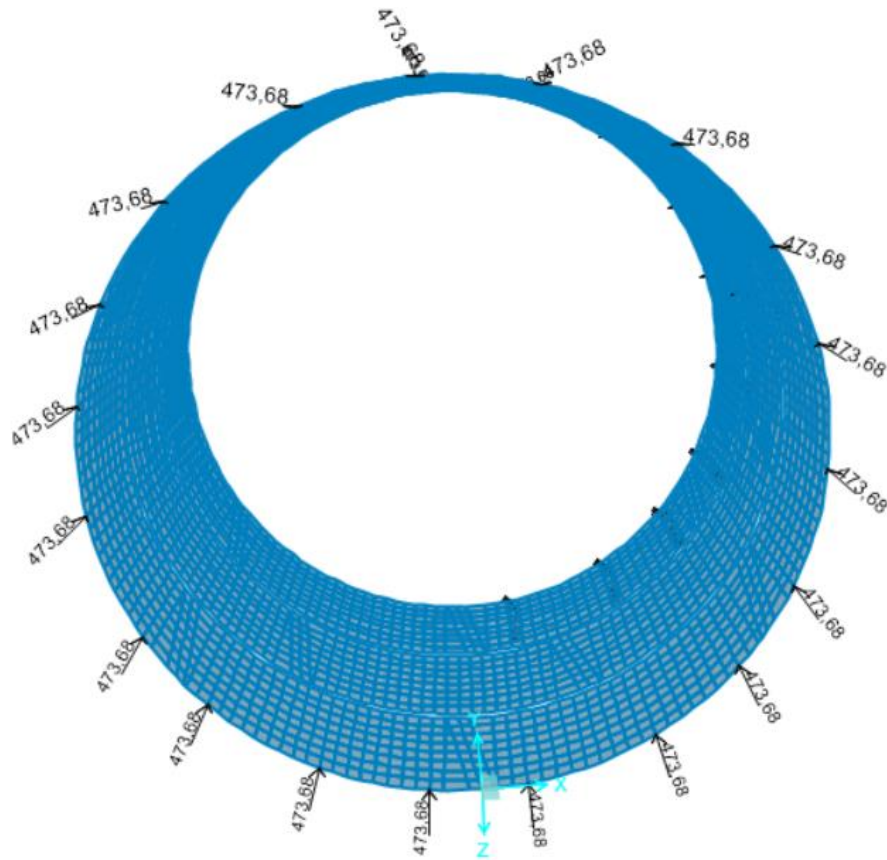
Por lo tanto, en el túnel habría ciertos huecos entre anillos por el efecto del alabeo y en las condiciones en las que se está ejecutando, cabe la posibilidad que el agua se introduzca por dichos agujeros, esto conllevaría muchos problemas de durabilidad sobre los materiales de los elementos resistentes del túnel.

La configuración de la posición de los anillos para formar un tramo del túnel ha sido escogida según la más desfavorable, es decir, no se intenta reducir el efecto del alabeo mediante la disposición de secciones que se abren y otras que cierran para compensar las deformaciones que se producen en el eje Z.

Por lo tanto, la modelización que se ha realizado en el programa de elementos finitos es la de construir anillos con la posición de la clave muy cerca entre los diferentes anillos, que forman la infraestructura lineal. De esta forma, se garantiza obtener los desplazamientos más desfavorables y ver la importación de la fuerza de los gatos a la hora de contribuir a la reducción de dicho efecto estructural.



A continuación, se muestra la modelización de los gatos hidráulicos en el modelo Sap2000:



**Figura 98.** Distribución de la fuerza de los gatos hidráulicos de 9.000 kN

En la ilustración anterior, se observa la distribución de la fuerza total de los gatos en 19 parte iguales, en este caso era de 9.000 kN, pero se han modelizado dos casos más y se ha interpolado y calculado el caso que genera un alabeo nulo.

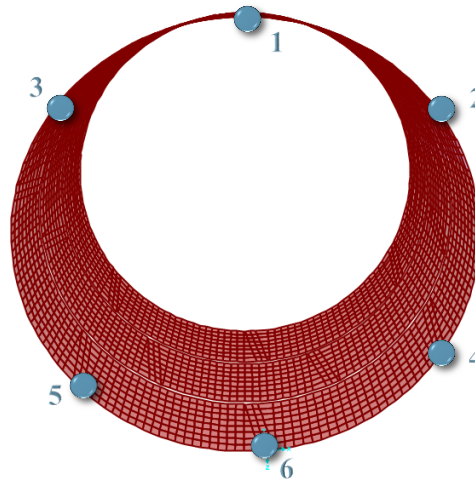
A continuación, se mostrará los resultados que generan la fuerza de los gatos tanto para los anillos con juntas circunferenciales articuladas como empotradas.

Se ha decidido solo realizar el estudio del efecto de los gatos hidráulicos en el caso del túnel con 3 anillos, que es el que más se asemeja a la construcción final de una infraestructura con estas características.

También se podrá observar el comportamiento que tiene el anillo en todo su perímetro, y se podrá deducir que secciones tiendan a cerrarse y cuales tienden a abrirse. De este modo, se puede encontrar alguna solución para minimizarlo durante la ejecución de la obra.

Los puntos de referencia de los cuales se obtienen los resultados, pueden mostrarse en la siguiente ilustración, donde se detalla de manera explícita su ubicación, para hacer más

entendible los resultados al lector y pueda orientarse de que puntos se están analizando y debatiendo acerca de su comportamiento estructural.



**Figura 99.** Puntos de referencia sobre el efecto del alabeo

Punto referencia	Punto	U3 (Alabeo) <i>m</i>	U3 (9.000 kN) <i>m</i>	U3 (60.000 kN) <i>m</i>	U3 (90.000 kN) <i>m</i>	U3 (50.263 kN) <i>m</i>
1	169	2,84E-02	0,89E-02	-0,21E-02	-0,59E-02	-9,22E-04
2	448	2,25E-02	0,42E-02	-9,09E-04	-0,23E-02	-3,29E-04
3	92	2,56E-02	0,97E-02	-0,84E-02	-2,12E-02	-0,48E-02
4	388	1,47E-02	7,63E-04	-0,25E-02	-0,43E-02	-0,19E-02
5	217	1,36E-02	0,34E-02	-1,00E-02	-2,22E-02	-0,66E-02
6	186	1,31E-02	0,18E-02	-0,36E-02	-0,73E-02	-0,25E-02

**Tabla 20.** Efecto de la fuerza de los gatos hidráulicos en la construcción de un túnel **Articulada**

De los resultados que se recogen de la tabla anterior se puede observar el comportamiento estructural del túnel que está constituido por 3 anillos consecutivos ubicados en diferentes posiciones.

Primero de todo, se puede observar las secciones más críticas que tienden a deformarse fuera del plano que contiene la sección del anillo. Se puede concluir que las secciones que más

sufren frente a los efectos del alabeo son las zonas superiores y las más cercanas a la dovela clave.

Por otro lado, las secciones ubicadas en la parte inferior y las que están más alejadas de la dovela clave son la que tienden a tener una deformado relativamente más inferior que las superiores, es decir, se puede considerar a efectos estructurales que las dovelas inferiores tienden a cerrarse.

Otro aspecto que se puede analizar es la importancia que tienen los gatos hidráulicos a la hora de intentar corregir las deformaciones producidas por el alabeo.

Como se puede observar se ha aplicado sobre el modelo estructural, que se encuentra cargado con las fuerzas exteriores mencionadas en los anteriores apartados, la fuerza de los gatos, y se ha realizado con diferentes valores de carga.

En la tabla se recoge los resultados obtenidos al aplicar para cada caso su fuerza de empuje de los gatos. Se han modelizado 3 principales casos (9.000 kN, 60.000 kN y 90.000 kN) para poder observar con claridad el comportamiento que genera el añadir una nueva fuerza exterior que intenta compensar el efecto del alabeo que se produce en las dovelas.

Como se observa en todos los puntos analizados, el efecto de los gatos proporciona un punto de vista positivo a efectos ingenieriles, dado que en todos los puntos al introducir la fuerza de los gatos el efecto del alabeo se reduce.

La reducción de la deformación producida fuera del plano del anillo está muy relacionada con la magnitud de la fuerza de los empujes de los gatos hidráulicos. Observando todos los puntos calculados se puede llegar a la conclusión que la fuerza necesaria para anular el alabeo es de 50.263 kN repartidos en 19 partes iguales.

También se observa que la fuerza de los gatos tiene más efecto en las zonas donde las dovelas tienden menos a abrirse, que lógicamente tiene mucho sentido estructural, por lo tanto, se prevé que el modelo está funcionando correctamente.

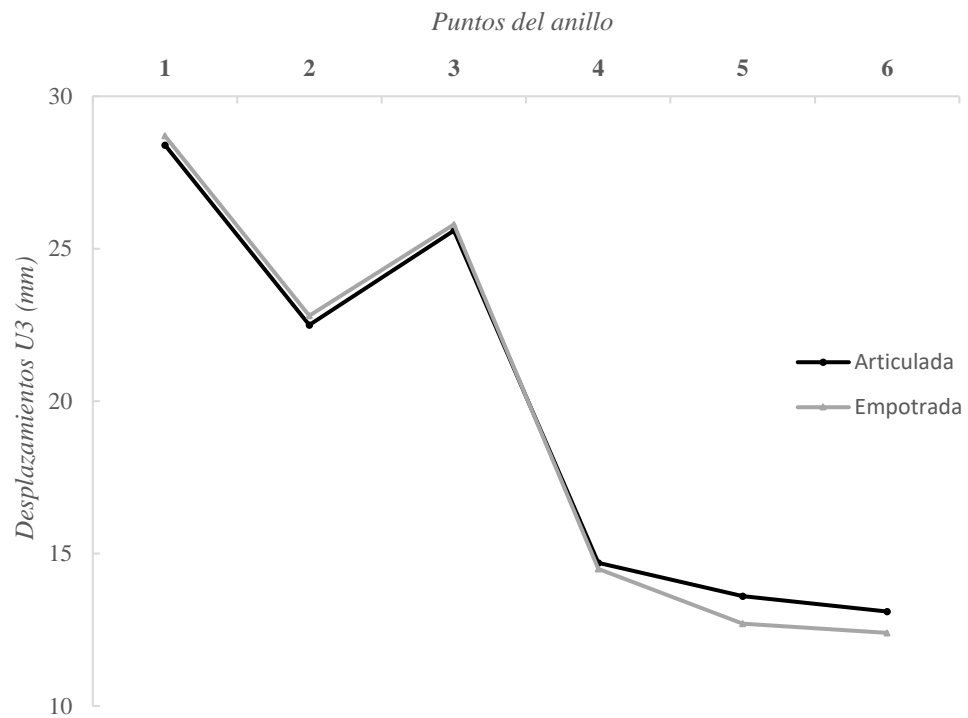
El hecho de tener que usar 50.263 kN para anular el efecto del alabeo, conlleva a que esta solución encontrado mediante elementos finitos solo se pueda llevar sobre terreno con gran capacidad resistente frente a los esfuerzos de empuje de la tuneladora.

Estos resultados han sido obtenidos empleando juntas circunferenciales que trabajan de manera articulada, a continuación, se podrá observar otra tabla similar a la anterior, pero empleando juntas empotradas, y poder observar cómo influye estructuralmente.

Punto referencia	Punto	U3 (Alabeo) <i>m</i>	U3 (9.000 kN) <i>m</i>	U3 (60.000 kN) <i>m</i>	U3 (90.000 kN) <i>m</i>	U3 (50.263 kN) <i>m</i>
1	169	2,87E-02	0,91E-02	-0,22E-02	-0,59E-02	-9,96E-04
2	448	2,28E-02	0,46E-02	-7,88E-04	-0,22E-02	-1,90E-04
3	92	2,58E-02	0,93E-02	-0,87E-02	-2,09E-02	-0,51E-02
4	388	1,45E-02	6,05E-04	-0,25E-02	-0,42E-02	-0,19E-02
5	217	1,27E-02	0,26E-02	-1,03E-02	-2,22E-02	-0,69E-02
6	186	1,24E-02	0,12E-02	-0,36E-02	-0,72E-02	-0,25E-02

**Tabla 21.** Efecto de la fuerza de los gatos hidráulicos en la construcción de un túnel **Empotrada**

Obviamente los puntos que se han escogido para el caso de juntas empotradas, son los mismos puntos que en el caso articulado. De esta forma, se garantiza que las diferencias que se encuentren son debidas al tipo de junta empleado y no otros aspectos que no se contemplan en esta tesina.



**Gráfica 10.** Comparativa del alabeo entre Articulada y Empotrada

De la gráfica anterior se puede apreciar una comparación del comportamiento del alabeo dependiendo según el tipo de condición de contorno que se imponga en las juntas longitudinales, que aparecen siempre en el medio entre dos dovelas que forman parte de la sección del anillo.

Según el gráfico se puede deducir que las zonas superiores del anillo se comportan relativamente igual, aunque es verdad que el anillo con condiciones de contorno articulado se alabea menos que la configuración que emplea juntas empotradas.

En cambio, a medida que se va avanzando hacia las zonas más cercanas a la parte inferior del anillo, se puede apreciar que se va obteniendo diferencias considerables en los resultados finales según la condición de contorno que se emplee.

En esta última apreciación, se puede observar que los papeles se han intercambiado a diferencia de las zonas más cercanas a la parte superior central del anillo. Es decir, empleando juntas empotradas se reduce de manera considerable el efecto del alabeo que si se emplea juntas articuladas.

Obviamente, como visión general el gráfico muestra de manera simple y sencilla lo que se había comentado anteriormente, las zonas más cercanas a la parte de la zona central superior (donde se encuentra la dovela clave) se obtienen más deformaciones que son las causantes del efecto del alabeo en comparación con los puntos más cercanos a la zona inferior del anillo.

Respecto al efecto que conlleva la introducción de los gatos en los diferentes casos analizados, se puede apreciar según los datos obtenidos en las tablas anteriores que independientemente del tipo de caso, el efecto es el mismo tanto para el caso articulado como el empotrado.

Es decir, la fuerza se reducirá el mismo incremento dependiendo de la deformación inicial que varía un poco según el caso que se esté estudiando. En ambos casos, se consigue prácticamente anular el efecto del alabeo con una carga total de 50.263 kN repartidos en 19 partes a lo largo del perímetro del anillo.

## 5. CONCLUSIONES

### 5.1 Conclusiones finales

Una vez finalizada la investigación que se ha llevado a cabo en este TFM, se procederá a explicar las conclusiones más relevantes que se han podido razonar a través de los resultados obtenidos del modelo numérico.

Antes todo se debe remarcar que los resultados obtenidos son unas aproximaciones, bastante buenas, en comparación con los valores que se suelen producir en la realidad física. Esto sucede debido al uso de muchos datos genéricos sobre las características de los materiales estructurales, condiciones de contorno, cargas y todos aquellos elementos que influyen en la salida de resultados.

Como resultado del estudio del comportamiento estructural de un túnel que ha sido analizado mediante elementos finitos, se detalla con claridad y brevedad, las conclusiones más importantes y significativas para el entendimiento de algunos problemas reales en este tipo de obra lineal.

- Mediante la comparativa obtenida entre usar un apoyo articulado o empotrado, se puede apreciar que la diferencia, obtenida entre ambas, es mínima; esta salida de resultados indica en que banda de comportamiento se puede encontrar el túnel. Debido a que es muy difícil determinar el comportamiento estructural de una junta comprimida, por lo tanto, se puede determinar que la importancia de apoyos es relativamente insignificante. En resumen, cuando se diseñe un túnel se determinará como condición de contorno un apoyo articulado entre juntas; es el caso más desfavorable y, por lo tanto, se estará diseñando la estructura del lado de la seguridad.
- Otro aspecto relevante que se debe recalcar, es la franja admisible obtenida donde se pueden mover los desplazamientos verticales como horizontales en la realidad física. Es decir, los movimientos que se obtendrán en la vida real no serán los mismos que

en esta tesina, ya que es difícil generar un empotramiento o articulación perfecta en obra. No obstante, esta franja proporcionará unos valores límites para determinar si los elementos, que forman parte del túnel, funcionarán correctamente.

- En la presente tesina queda reflejado el comportamiento del efecto del alabeo que se produce en los anillos del túnel. Donde se puede deducir que dicho efecto no depende de la fase constructiva, sino de la posición donde se ubique la dovela clave; el caso con mayor deformación fuera del plano del anillo, es cuando más cerca se ubiquen estas dovelas en diferentes anillos contiguos. Además, se observa que la deformación por alabeo es acumulativa, va creciendo en función del número de anillos que contenga el túnel; dicha progresión se puede considerar asintótica, es decir, se aprecia una gran diferencia en la deformación axial entre el primer anillo y el segundo, pero a medida que van aumentando los anillos, el efecto del alabeo se estabiliza.
- Por último, se ha apreciado que el efecto del alabeo en la dirección axial, en algunos casos, no queda totalmente compensado con un empuje razonable para poder comprimir las juntas circunferenciales. Por ejemplo, en suelos blandos se puede avanzar con poca fuerza axial, esto conlleva a tener ciertas ventajas, como reducir el desgaste de la tuneladora o evitar romper alguna dovela por un exceso de fuerza de gatos; pero se debe tener en cuenta que el anillo tiende abrirse y, si no se le aplica una fuerza necesaria para que vuelva a su posición inicial, pueden quedar ciertas oberturas por donde se filtre el agua y ocasionar ciertos problemas de durabilidad. En resumidas palabras, el alabeo puede inducir pérdidas de compresión que no puedan ser compensadas por los efectos del empuje axial de la tuneladora.

## **5.2 Nuevas futuras líneas de investigación**

El problema planteado en esta investigación es muy complejo y depende de muchos factores, obviamente no todos han sido considerados, por lo tanto, este TFM es un comienzo para empezar a entender ciertas incertidumbres que generaba este tipo de estructura.

El resultado más importante en este TFM es el alabeo, esto conlleva a que las futuras investigaciones se centren en este aspecto introduciendo nuevas mejoras en el modelo numérico. A continuación, se detalla ciertos aspectos que se deberían tener en cuenta en las futuras investigaciones:

- Introducir más anillos y contrastar si la deformación producida por el alabeo se mantiene asintótica. De esta forma, se podrá deducir si este efecto está relacionado de manera directa con los problemas de gotera que aparecen en los túneles.
- Realizar varios modelos, donde la posición de la dovela clave varíe y realizar su respectiva comparación entre ellas.
- También se debería realizar el mismo procedimiento que se ha llevado a cabo en esta tesina, pero con dovelas rectas, así se podría obtener una comparativa del tipo de dovela más adecuado para reducir el efecto del alabeo.
- Estudiar el efecto de impermeabilidad, es decir, localizar las zonas donde se producen más pérdidas de compresión y realizar un estudio de como solventar dicho problema.



## 6. REFERENCIAS

### 6.1 Referencias bibliográficas

- [1] Arnau, O., & Molins, C. (2012). Three dimensional structural response of segmental tunnel linings. *Engineering Structures*, 44, 210-221. doi: 10.1016/j.engstruct.2012.06.001
- [2] Arnau, O., Molins, C., Blom, C., & Walraven, J. (2012). Longitudinal time-dependent response of segmental tunnel linings. *Tunnelling And Underground Space Technology*, 28, 98-108. doi: 10.1016/j.tust.2011.10.002
- [3] Blom, C. (2002). *Design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils*. Delft, Netherlands: DUP Science.
- [4] Das, B. (2013). *Advanced Soil Mechanics, Fourth Edition*. Hoboken: CRC Press.
- [5] Duddeck, H. (1982). *Structural design models for tunnelling*. New York: Pergamon Press.
- [6] Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., Wehrmeyer, G., & Sturge, D. (2012). *Mechanised Shield Tunnelling 2e*. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische.
- [7] Thomas Telford Services Ltd. (1997). *Model specification for tunnelling*. London.

- [8] Ngan Vu, M., Broere, W., & Bosch, J. (2017). Structural Analysis for Shallow Tunnels in Soft Soils. *International Journal Of Geomechanics*, 17(8), 04017038. doi: 10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000866
- [9] Oñate, E. (2013). *Structural analysis with the finite element method*. Berlin: Springer Netherland.
- [10] Priego de los Santos, E. (2013). *Túneles y tuneladoras*. Valencia, España: Universitat Politècnica de València.
- [11] Ráček, V., & Zlámál, J. (2017). The ultimate limit state of the underground circular tunnel segment lining. *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 236, 012085. doi: 10.1088/1757-899x/236/1/012085
- [12] Shiraishi, S. (1969). RECENT MAJOR SHIELD-DRIVEN TUNNELS THROUGH SOFT GROUND IN JAPAN. *SOILS AND FOUNDATIONS*, 9(3), 16-34. doi: 10.3208/sandf1960.9.3\_16
- [13] Thomas Telford. (2010). *Specification for tunnelling, 3rd ed*. London, England.
- [14] Whittaker, B., & Frith, R. (1990). *Tunnelling*. London: Institution of Mining and Metallurgy.